

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Mario Golubić**

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Mario Golubić

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću na podršci i korisnim savjetima tijekom izrade diplomskog rada.

Posebno hvala asistentu Ivanu Juriću, mag. ing. mech. na utrošenom vremenu, suradnji, korisnim i stručnim savjetima te stručnom vođenju kompletnog eksperimentalnog dijela rada.

Također se zahvaljujem djelatnicima Laboratorija za zavarivanje na pomoći pri izradi eksperimentalnog rada.

Posebno hvala mojoj ženi i obitelji na bezuvjetnoj podršci, pomoći i razumijevanju tijekom cijelog studija.

Mario Golubić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

### DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MARIO GOLUBIĆ** Mat. br.: **0035190020**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Usporedna analiza zavarenih spojeva izrađenih konvencionalnim MAG i D-Arc postupkom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Comparative analysis of welded joints produced by conventional MAG and D-Arc process**

**Opis zadatka:**

U teorijskom dijelu potrebno je opisati opremu koja se koristi kod konvencionalnog MAG postupka zavarivanja te obraditi strujno-naponske karakteristike izvora struje. Detaljno analizirati specifičnosti opreme za modificiranu inačicu MAG postupka koja za prijenos metala primjenjuje zakopani električni luk (D Arc). Posebno se osvrnuti na dodavač žice i izvor struje sa stanovišta intermitencije i dinamičke karakteristike. Navesti uobičajene greške koje se javljaju pri konvencionalnom MAG zavarivanju konstrukcijskih čelika.

U eksperimentalnom dijelu rada za sučeljeni spoj limova debljine 20 mm od konstrukcijskog čelika kvalitete S355 odrediti optimalnu tehnologiju zavarivanja za konvencionalni MAG postupak i D-Arc. Na uzorcima provesti prikladna nerazorna i razorna ispitivanja uključujući makroanalizu zavara i detaljnu obradu mikrostrukture metala zavara i zone utjecaja topline. Analizirati uzorke sa stanovišta homogenosti materijala i eventualnih grešaka u zavarenom spoju te donijeti zaključke o primjenjivosti D-Arc postupka za specifičnu konfiguraciju spoja.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
03. svibnja 2018.

Rok predaje rada:  
05. srpnja 2018.

Predviđeni datum obrane:  
11. srpnja 2018.  
12. srpnja 2018.  
13. srpnja 2018.

Zadatak zadao:  
prof. dr. sc. *Garašić*  
prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:  
*Runje*  
prof. dr. sc. Biserka Runje

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS KRATICA .....	VII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY .....	X
1. UVOD.....	1
2. MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA .....	3
2.1. Oprema za MAG postupak zavarivanja .....	5
2.1.1. Izvor struje .....	7
2.1.1.1. Inverterski izvori struje za MAG zavarivanje.....	8
2.1.1.2. Podešavanje parametara MAG zavarivanja .....	9
2.1.1.3. Pregled statičkih i dinamičkih karakteristika izvora napajanja.....	10
2.1.2. Sustav za dodavanje žice.....	13
2.1.3. Pištolj za zavarivanje .....	15
3. D-ARC POSTUPAK ZAVARIVANJA .....	17
3.1. Prijenos metala zakopanim električnim lukom .....	18
3.1.1. Stabilizacija zakopanog luka visoke struje .....	20
4. NEPRAVILNOSTI (GREŠKE) U ZAVARENOM SPOJU .....	24
4.1. Pukotine .....	25
4.1.1. Tople pukotine .....	26
4.1.2. Hladne pukotine .....	29
4.1.3. Izbjegavanje nastajanja pukotina .....	30
4.2. Šupljine – poroznost.....	31
4.2.1. Utjecaj poroznosti na čvrstoću zavarenog spoja .....	33
4.2.2. Uzroci i izbjegavanje nastajanja poroznosti .....	33
4.3. Čvrsti uključci .....	34
4.3.1. Utjecaj čvrstih uključaka na čvrstoću zavarenog spoja .....	35
4.3.2. Izbjegavanje nastajanja čvrstih uključaka u zavaru .....	35
4.4. Naljepljivanje i nedovoljni provar .....	36

---

4.4.1. Uzroci naljepljivanja .....	36
4.4.2. Uzroci nedovoljnog provara.....	37
4.4.3. Izbjegavanje pogrešaka naljepljivanja i nedovoljnog provara .....	38
5. EKSPERIMENTALNI DIO .....	39
5.1. Oprema za zavarivanje.....	39
5.1.1. Oprema za konvencionalni MAG postupak zavarivanja .....	39
5.1.2. Oprema za D-Arc postupak zavarivanja .....	41
5.2. Osnovni materijal .....	44
5.3. Dodatni materijal i zaštitni plinovi.....	45
5.4. Priprema uzoraka .....	46
5.5. Zavarivanje uzoraka .....	48
5.5.1. MAG postupak zavarivanja .....	48
5.5.2. D-Arc postupak zavarivanja.....	51
5.6. Provedena ispitivanja .....	53
5.6.1. Radiografsko ispitivanje .....	53
5.7. Analiza makrostrukture i mikrostrukture .....	56
5.8. Mjerenje tvrdoće .....	62
5.9. Analiza rezultata .....	66
6. ZAKLJUČAK.....	71
LITERATURA.....	73
PRILOZI.....	76

## POPIS SLIKA

Slika 1. Shema prikaza MAG postupka zavarivanja [6] .....	4
Slika 2. Shema sustava za MAG zavarivanje [11] .....	6
Slika 3. Izvor struje za MAG zavarivanje [14] .....	7
Slika 4. Blok dijagram inverterskog izvora struje za zavarivanje [12] .....	8
Slika 5. Statička karakteristika izvora struje uz održavanje konstantnog napona prilikom MAG zavarivanja [20].....	10
Slika 6. Utjecaj induktiviteta na uspon i silaz električnog impulsa [12].....	11
Slika 7. Trofazni fazno upravljivi tiristorski ispravljač u mosnom spoju [23] .....	12
Slika 8. Izlaz napona i struje trofaznog fazno upravljivog tiristorskog ispravljača u mosnom spoju [23].....	12
Slika 9. Sustav za dodavanje žice [24] .....	13
Slika 10. Dodavanje žice push sustavom [26].....	14
Slika 11. Dobava žice push - pull sustavom [26].....	15
Slika 12. Komponente pištolja za zavarivanje sa zračnim hlađenjem [27].....	15
Slika 13. Komponente pištolja s vodenim hlađenjem [29] .....	16
Slika 14. Konfiguracija visokoučinkovitog robotiziranog D-Arc sustava za zavarivanje [1] .	17
Slika 15. Zakopani električni luk, pogled izvana [1] .....	18
Slika 16. Zakopani električni luk, prikaz procesa iznutra [1] .....	19
Slika 17. Razlika između konvencionalnog zavarivanja i zavarivanja zakopanim lukom [2].	19
Slika 18. Razlika u pripremi spoja [2].....	20
Slika 19. Nestabilno ponašanje zakopanog luka [1] .....	21
Slika 20. Ponašanje stabiliziranog zakopanog luka pomoću niskofrekventno modulirane kontrola napona [1] .....	21
Slika 21. Prikaz valnog oblika struje [1] .....	22
Slika 22. Shematski prikaz ponašanja luka [1] .....	22
Slika 23. Usporedba izgleda zavara: Konvencionalni zakopani luk (lijevo) i primjena niskofrekventno modulirane kontrola napona (desno) [1] .....	23
Slika 24. Mehanizam nastajanja toplih pukotina [31].....	27
Slika 25. Topla pukotina na licu zavara [33] .....	28
Slika 26. Topla pukotina ispod površine zavara [34].....	28

Slika 27. Hladna pukotina u ZUT-u sučeljenog spoja [35].....	30
Slika 28. Poroznost u sučeljenom spoju [36] .....	31
Slika 29. Uključci troske kod MAG postupka zavarivanja [31] .....	35
Slika 30. Naljepljivanje u sučeljenom spoju [37] .....	37
Slika 31. Neprovaren korijen zavora [31] .....	37
Slika 32. Almaga OTC AX V6 .....	40
Slika 33. Robotska stanica za D-Arc postupak zavarivanja.....	41
Slika 34. Izvori struje za D-Arc postupak zavarivanja.....	42
Slika 35. Karakteristike izvora struje WB – M500D .....	42
Slika 36. Sustav za dodavanje žice.....	43
Slika 37. Međuspremnik žice .....	44
Slika 38. Specifikacije žice EZ – SG 2 [40].....	45
Slika 39. Pozicioniranje uzorka za MAG postupak zavarivanja .....	47
Slika 40. Pozicioniranje uzorka za D-Arc postupak zavarivanja .....	47
Slika 41. Priprema spoja i redoslijed prolaza za MAG postupak zavarivanja .....	48
Slika 42. Priprema spoja i redoslijed prolaza za D-Arc postupak zavarivanja .....	48
Slika 43. Korijenski prolaz.....	50
Slika 44. Deformacija nakon završnog prolaza.....	50
Slika 45. Rasprskavanje tijekom D-Arc postupka zavarivanja .....	51
Slika 46. Metalne kapljice uzrokovane rasprskavanjem tijekom zavarivanja .....	52
Slika 47. Diskontinuitet korijen zavora .....	52
Slika 48. Deformacije nakon D-Arc postupka zavarivanja.....	53
Slika 49. Uzorak 1 prije radiografskog ispitivanja.....	55
Slika 50. Radiogram uzorka 1 .....	55
Slika 51. Radiogram uzorka 2 .....	56
Slika 52. Makroizbrusak 1 .....	57
Slika 53. Makroizbrusak 2 .....	57
Slika 54. Makroizbrusak 3 .....	58
Slika 55. Makroizbrusak 1 – korijen zavora.....	59
Slika 56. Makroizbrusak 1 – lice zavora .....	60
Slika 57. Makroizbrusak 2 – korijen zavora.....	60
Slika 58. Makroizbrusak 2 – lice zavora .....	61
Slika 59. Makroizbrusak 3 – korijen zavora.....	61



---

Slika 60. Makroizbrusak 3 – lice zavora .....	62
Slika 61. Vickersova metoda ispitivanja tvrdoće [43] .....	63
Slika 62. Mjerenje tvrdoće .....	64
Slika 63. Točke mjerenja tvrdoće na makroizbrusku 2 .....	65
Slika 64. Usporedba trajanja MAG i D-Arc postupaka zavarivanja .....	67
Slika 65. Grafički prikaz tvrdoće uzorka 1 (MAG) .....	68
Slika 66. Grafički prikaz tvrdoće uzorka 2 (D-Arc).....	69

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Parametri zavarivanja kod nestabilnog i stabilnog zakopanog luka [1].....	21
Tablica 2. Pukotine u zavarenom spoju [31,32] .....	25
Tablica 3. Šupljine (poroznost) u zavarenom spoju [31,32] .....	31
Tablica 4. Čvrsti uključci u zavarenom spoju [31,32] .....	34
Tablica 5. Naljepljivanje i nedovoljni provar [31,32] .....	36
Tablica 6. Karakteristike izvora struje OTC Daihen DP 400.....	40
Tablica 7. Kemijski sastav čelika S355 za nominalnu debljinu 16 mm [39] .....	44
Tablica 8. Mehanička svojstva čelika S355 za nominalnu debljinu 16 mm [39].....	45
Tablica 9. Kemijski sastav žice VAC 60 [2] .....	46
Tablica 10. Mehanička svojstva žice VAC 60 [2] .....	46
Tablica 11. Volumni sastav zaštitnih plinova [41].....	46
Tablica 12. Parametri zavarivanja MAG postupkom.....	49
Tablica 13. Parametri zavarivanja D-Arc postupkom .....	51
Tablica 14. Podaci o opremi te parametri skeniranja i snimanja .....	54
Tablica 15. Označavanje makroizbrusaka.....	56
Tablica 16. Vrijednosti tvrdoće makroizbruska 1 (MAG) .....	65
Tablica 17. Vrijednosti tvrdoće makroizbruska 2 (D-Arc) .....	66
Tablica 18. Ukupno trajanje MAG postupka zavarivanja.....	66
Tablica 19. Ukupno trajanje D-Arc postupka zavarivanja .....	67
Tablica 20. Prednosti i nedostaci provedenih postupaka .....	69

**POPIS KRATICA**

<b>Oznaka</b>	<b>Opis</b>
MAG	Elektrolučno zavarivanje u zaštiti aktivnog plina
D-Arc	Viskouchinkoviti postupak zavarivanja zakopanim lukom
ZUT	Zona utjecaja topline
CO <sub>2</sub>	Ugljični dioksid
MIG	Elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnog plina
GMAW	Elektrolučno zavarivanja u plinskoj zaštiti
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
Ar	Argon
TIG	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina
IGBT	Bipolarni tranzistor s izoliranom upravljačkom elektrodom
DC	Istosmjerna struja
AC	Izmjenična struja
EPP	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitom praška
VP	Varijabilni polaritet
C	Ugljik
Mn	Mangan
P	Fosfor
S	Sumpor
Si	Silicij
HV10	Tvrdoća po Vickersu
RTG	Rendgensko snimanje



## SAŽETAK

U ovome radu obrađena je usporedna analiza zavarenih spojeva izrađenih konvencionalnim MAG i novorazvijenim D-Arc postupkom zavarivanja.

U teorijskom dijelu najprije je opisan konvencionalni MAG postupak zavarivanja. Opisana je potrebna oprema s naglaskom na izvor struje pri kojem su detaljno obrađene strujno – naponske karakteristike. Uz izvor struje opisan je i sustav za dodavanje žice te pištolji za zavarivanje. Nadalje, predstavljen je i novorazvijeni D-Arc postupak zavarivanja kod kojeg je najveća pažnja posvećena načinu prijenosa metala. Tako je detaljno opisan prijenos metala zakopanim električnim lukom te njegova stabilizacija pri visokim vrijednostima struje. Za kraj su opisane nepravilnosti koji se najčešće javljaju u procesima provedenima u eksperimentu.

U eksperimentalnom dijelu rada detaljno je opisana priprema sučeljenih spojeva od konstrukcijskog čelika kvalitete S355 debljine 19 mm i oprema za MAG i D-Arc postupak kojom su ti spojevi zavareni. Na zavarenim uzorcima provedeno je radiografsko ispitivanje, ispitivanja mikrostrukture i makrostrukture te tvrdoća. Na kraju su analizirani dobiveni rezultati te je dan zaključak o izboru optimalnog procesa zavarivanja za pripremljene uzorke.

Ključne riječi: MAG, D-Arc, dinamička i statička karakteristika, zakopani električni luk, greške

## SUMMARY

In this thesis comparative analysis of welded joints welded by conventional MAG and newly developed D-Arc welding process is described.

In the theoretical part, primarily, conventional MAG proces is described. Descriptions of equipment are given, with the emphasis on the power source and its static and dynamic characteristics. Wire supply and welding guns are also described. Furthermore, newly developed D-Arc welding process is presented with maximum attention to the metal transfer. Metal transfer with buried arc and its stabilization at high current is described in detail. At the end, possible irregularities of welding joints are presented.

In the experimental part of the thesis, preparation of butt welded joints made of S355 construction steel and equipment for MAG and D-Arc welding process are described in detail. Radiography, microstructural and macrostructural analysis and hardness measurements were performed on the specimens. At the end, the obtained results were analyzed and conclusion on the optimal welding process for the prepared specimens is given.

Key words: MAG, D-Arc, dynamic and static characteristic, buried arc, irregularities

## 1. UVOD

Elektrolučni postupak zavarivanja taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina (MAG) jedan je od najzastupljenijih postupaka nerastavljivoga spajanja u industriji. Unatoč svojoj relativno dugoj povijesti, kontinuirani razvoj i istraživanje ovoga postupka zavarivanja (ponajprije zahvaljujući razvoju izvora struje za zavarivanje) pruža mogućnosti novih poboljšanja, a konačni cilj je kvaliteta zavarenih spojeva, visoka produktivnost i ekonomičnost postupka. Uz to, postupak je moguće robotizirati bez većih problema zato što izvedbom pripada poluautomatskim postupcima. Mehanizirani dovod žice u električni luk čini proces kontinuiranim. Ugradnjom pištolja za zavarivanje u robotski manipulator dobiven je sustav kojim se upravlja putem privjeska za učenje, u odgovarajućem softveru.

Razvoj procesa zavarivanja čvrsto je povezan s potrebom povećanja produktivnosti bez gubitka kvalitete zavara. Razvoj inverterskih izvora struje za zavarivanje omogućio je nove alternative pri kontroli procesa zavarivanja. Za zavarivanje debelih limova u praksi primjenjuju se razni postupci poput elektrolučnog zavarivanja pod praškom ili troskom, elektroplinskog zavarivanja, zavarivanja trenjem i sl. Posebno su dobro proučavani postupci zavarivanja laserom i zavarivanja plazmom kojima se može realizirati zavarivanje punom penetracijom u jednom prolazu sučeljenog spoja primjenom tzv. Ključanice te hibridni postupci. Svi ovi postupci vrlo su učinkoviti, ali imaju puno ograničenja poput položaja zavarivanja, oblika pripreme itd. S druge strane MAG postupak je relativno fleksibilan, ali se za zavarivanje debelih limova zahtijeva izvedba s više prolaza obzirom na to da su uobičajeni izvori struje ograničeni na 500 A. Provedena novija istraživanja pokazuju da se MAG može uspješno koristiti za zavarivanje većim brzinama, ali ne postoji mnogo primjera za visokoučinsko zavarivanje debelih ploča.

Jedna od mogućnosti zavarivanja debelih limova je takozvani zakopani luk. Zakopani električni luk (eng. buried arc) općenito je poznat kao jedan od fenomena ponašanja električnog luka te postoje primjeri u zavarivačkoj literaturi. Iako nije precizirana jasna definicija podrazumijeva se da je to fenomen pri kojem je električni luk postavljen ispod razine površine rastaljenog metala zavara. Obzirom na to da je izvor topline postavljen dublje u odnosu na konvencionalni električni luk može se postići veća penetracije što ovaj modalitet električnog luka čini prikladnim za zavarivanje debljih materijala [1].

Kod konvencionalnih načina prijenosa metala, električni se luk održava iznad rastaljenog metala. Tako je zagrijavan samo gornji dio materijala i to je razlog ograničene penetracije. Za zavarivanje debelih materijala potrebna je odgovarajuća priprema žlijeba, te se zavarivanje vrši u više prolaza. To znači da je potrebna veća količina dodatnog materijala, više vremena zbog hlađenja između prolaza te dolazi do većih deformacija. Ova mogućnost duboke penetracije zakopanim lukom korištena je u novom D-Arc sustavu razvijenom od Daihen korporacije. U usporedbi s klasičnim procesima zavarivanja debelih materijala u kojima se koriste velike struje i više prolaza, D-Arc proces zavarivanja zahtijeva manje vremena i jednostavniju pripremu žlijeba. Zbog jednostavnije pripreme žlijeba, manja je potrošnja žice. Kod uporabe postupka zavarivanja u više prolaza potrebna je i veća količina dodatnog materijala u žlijebu što znači veće troškove dodatnog materijala. Izvedbom višeprolaznog zavarivanja u širokom žlijebu moguće je postići veći volumen rastaljenog materijala s manjim unosima topline. To ima dobar utjecaj na mikrostrukturu zavara i ZUT, ali s druge strane suma ovih unosa topline može uzrokovati veća zaostala naprezanja i veće deformacije [2].

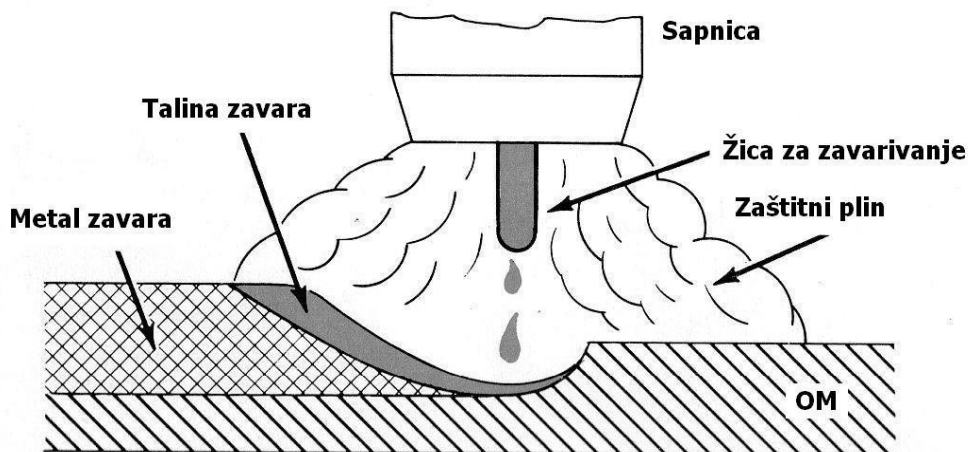


## 2. MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA

MAG (Metal Active Gas) zavarivanje je elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi. To je postupak spajanja metala taljenjem i očvršćivanjem dijela osnovnog metala i dodatnog metala [3]. Kod ovoga postupka zavarivanja električni luk se održava između taljive kontinuirane elektrode u obliku žice koja je u pravilu spojena na pozitivan pol istosmjernog izvora struje te je ujedno i dodatni materijal. Taj proces odvija se u zaštitnoj atmosferi koju osiguravaju aktivni zaštitni plinovi (CO<sub>2</sub> ili mješavine) [4].

Iako se osnovni principi i razvoj kontinuiranoga električnoga luka za zavarivanje spominju već početkom 19. stoljeća, elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnih/aktivnih plinova (MIG/MAG ili GMAW - Gas Metal Arc Welding) primjenu u industriji nalazi tek sredinom 20. stoljeća. Ovaj je postupak prvotno namijenjen zavarivanju aluminijskih legura na bazi aluminijskih te ostalih obojenih materijala, a veću primjenu u zavarivanju čelika pronalazi razvojem aktivnih plinova i mješavina plinova koje su znatno smanjile cijenu zavarivanja. Razvoj ovoga postupka prije svega je potaknut zbog veće brzine zavarivanja, veće količine rastaljenoga materijala u jedinici vremena, jednostavnoga rukovanja ili automatizacije, zbog čega je i danas jedan od najčešće korištenih postupaka u zavarivačkoj industriji [5].

Pogonski sustav dodaje žicu konstantnom brzinom kroz cijevni paket i pištolj do električnog luka. Taljenjem žice popunjava se pripremljeni žlijeb. Postupak može biti poluautomatski (dodavanje žice mehanizirano, a vođenje pištolja ručno) ili automatski [4]. Slika 1 prikazuje shematski prikaz postupka MAG zavarivanja.



**Slika 1. Shema prikaza MAG postupka zavarivanja [6]**

Ako se samo zavarivanje vrši na udaljenosti većoj od 5 metara od izvora struje obično se primjenjuje dodatni pogon za dodavanje žice koji je smješten u samom pištolju. Naziv za takav sustav je *push-pull*. Njegova primjena uobičajena je i na manjim udaljenostima ako se radi s mekšim ili tanjim dodatnim materijalom. Plinovi se dovode na mjesto zavarivanja kroz posebnu sapnicu na pištolju [4].

Prednosti [3,7,8,9]:

- mogućnost zavarivanja širokog spektra materijala različitih debljina, ali i vrsta
- zavarivanje u svim položajima
- visoka iskoristivost dodatnog materijala
- visoka učinkovitost postupka zavarivanja u usporedbi s ostalim elektrolučnim postupcima
- odličan izgled zavarenih spojeva
- relativno jednostavna obuka zavarivača
- manji utjecaj operatera (zavarivača) na proces zavarivanja
- manji unos topline u usporedbi s drugim zavarivačkim postupcima
- stvaranje manje količine zavarivačkih plinova u usporedbi s REL postupkom
- lako i brzo čišćenje zavarenih spojeva, minimalno rasprskavanje kod prijenosa štrcajućim lukom
- nizak unos vodika u metal zavara (uglavnom manje od 5 ml/100 g metala zavara)
- manja deformacija osnovnih materijala u slučajevima primjene suvremenih MIG/MAG postupaka
- jednostavna automatizacija procesa

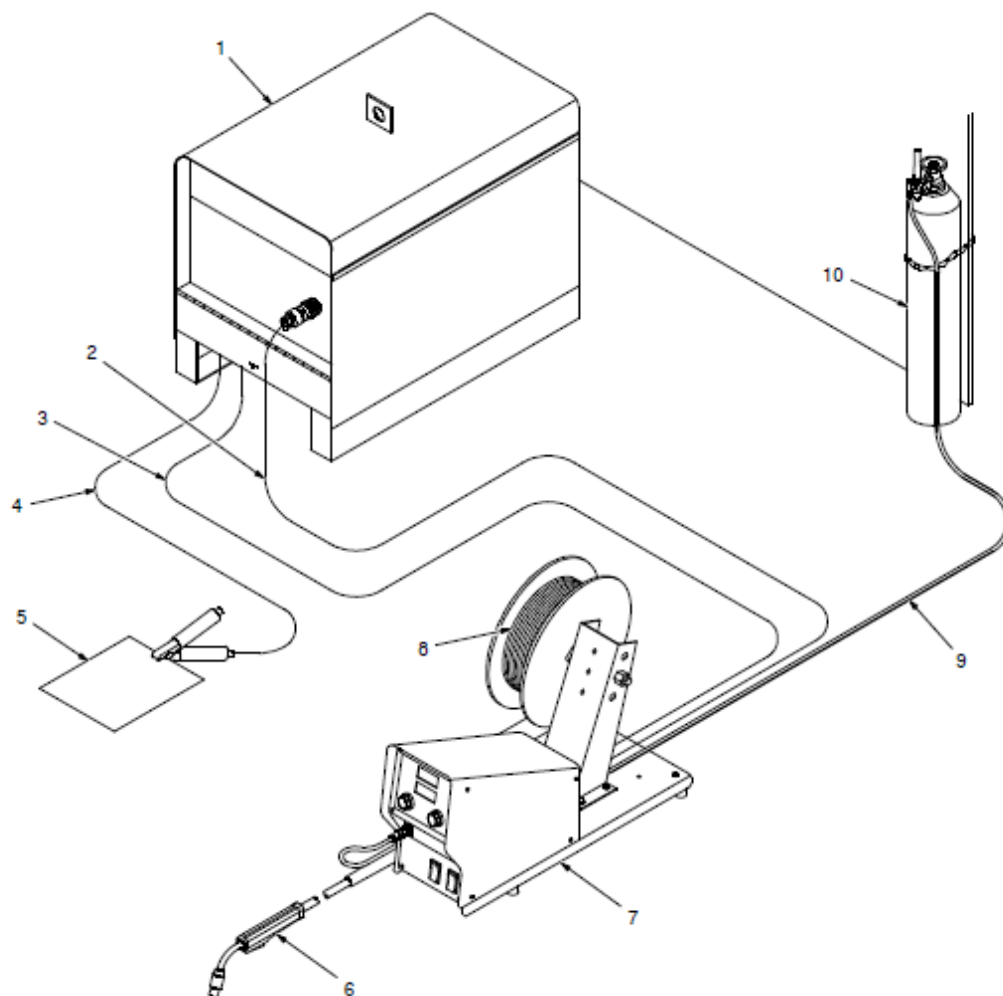
- niža cijena dodatnih materijala i općenito niža cijena zavora po jedinici duljine u usporedbi s ostalim elektrolučnim postupcima
- mogućnost primjene različitih plinskih mješavina
- mogućnost primjene praškom punjene žice
- mogućnost primjene i za lemljenje.

Nedostaci [3,7,8,9]:

- manji toplinski input kod prijenosa metala kratkim spojevima - zavarivanje samo tanjih materijala
- veći toplinski input kod prijenosa metala štrcajućim lukom - zavarivanje samo debljih materijala
- nemogućnost zavarivanja u prisilnim zavarivačkim položajima prilikom upotrebe aksijalnog prijenosa metala štrcajućim lukom
- potreba za primjenom skupljih zaštitnih plinova kod prijenosa metala štrcajućim lukom (mješavine zaštitnih plinova na bazi Ar, osjetno su skuplje od čistog CO<sub>2</sub>)
- mogućnost pojave pogrešaka u zavarenim spojevima kod terenskih radova zbog vanjskih utjecaja
- problemi kod dovođenja dodatnog materijala (žice) kod zavarivanja aluminija i aluminijevih legura
- veći broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja
- rasprskavanje kod prijenosa metala kratkim spojevima, gubitak istog i potreba za dodatnim čišćenjem
- opasnost od grešaka u početku zavarivanja
- složenost uređaja i opreme za zavarivanje.

## 2.1. Oprema za MAG postupak zavarivanja

Sami uređaji, koji se koriste u MAG zavarivanju po složenosti, mogu biti od jednostavnih pa sve do programibilnih u kojima mogu biti urađena računala s velikom bazom podataka za parametre zavarivanja. Kod odabira opreme za zavarivanje utjecaj ima primjena, zahtjevi pojedinog korisnika, ali i financijska situacija pojedinog korisnika [10]. Oprema za MAG postupak zavarivanja prikazana je na slici 2:



**Slika 2. Shema sustava za MAG zavarivanje [11]**

1. Izvor struje
2. Kabel za napajanje kontrolnog uređaja
3. Kabel uređaja za ulaganje
4. Kabel za uzemljenje
5. Radni komad
6. Pištolj za zavarivanje
7. Uređaj za konstantnu brzinu dobave žice
8. Kolut za žicom (dodatnim materijalom)
9. Crijeva za plin
10. Boca sa zaštitnim plinom

### 2.1.1. Izvor struje

Glavni dio opreme za zavarivanje je izvor struje. Njegova zadaća je osiguravanje dobre uspostave električnoga luka i održavanje njegove stabilnosti. Izvori struje za zavarivanje su uređaji za proizvodnju struje različitih vrsta i svojstava kojima se ostvaruje postupak zavarivanja. Ovisno o unutrašnjoj građi izvora struje, o čemu ovisi vrsta i svojstva izlazne struje, izvori struje za zavarivanje dijele se na: transformatore, ispravljače i invertere kao uređaje koji se spajaju na električnu mrežu te na motore s unutrašnjim izgaranjem s generatorom koji se koriste na mjestima gdje je električna mreža slaba ili je uopće nema. Vrstu izvora struje odabiremo na temelju željene izlazne struje i njenih svojstava [12]. Danas se, kao izvori struje za MAG zavarivanje, najčešće koriste inverterski izvori struje za zavarivanje. Jedan takav karakteristični uređaj za MAG zavarivanje prikazan je na slici 3. Kako bi se dobio stabilan električni luk, izvor struje mora imati prikladno postavljenu ili podesivu karakteristiku i izlaz za odgovarajuće vrijednosti induktiviteta. Pri tome važnu ulogu imaju odnos jakosti struje i napona zavarivanja što se još naziva i statička karakteristika izvora struje. Izvori struje za REL i TIG imaju strmopadajuću statičku karakteristiku dok se kod MAG postupka uglavnom koristi ravna statička karakteristika [13].

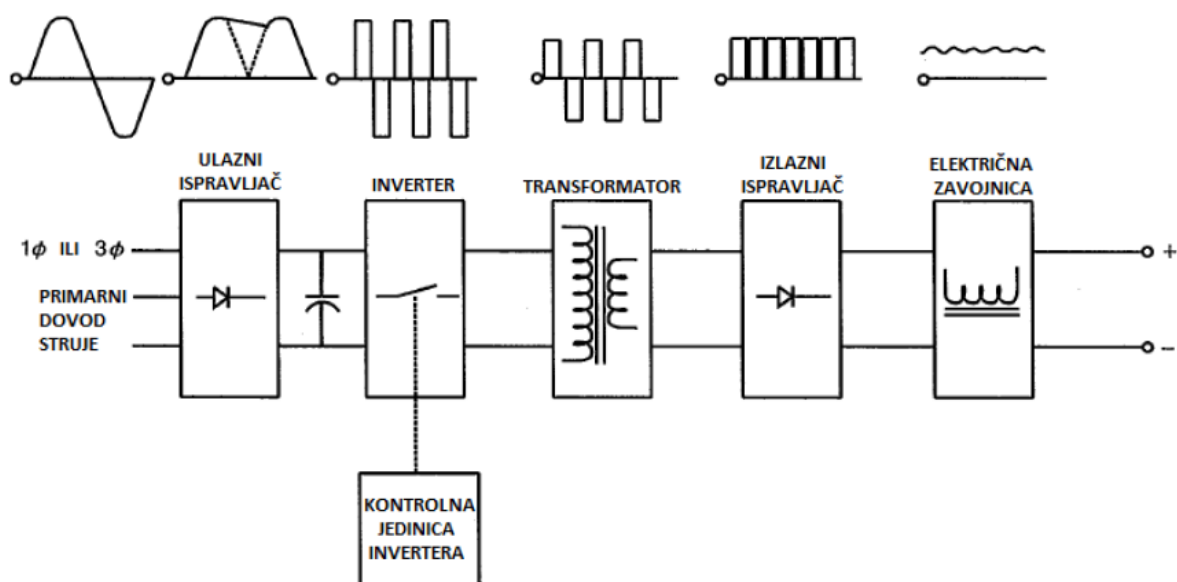


Slika 3. Izvor struje za MAG zavarivanje [14]

### 2.1.1.1. Inverterski izvori struje za MAG zavarivanje

Dizajn i mogućnosti izvora struje za zavarivanje su se promijenili i nastavljaju se ubrzano mijenjati. Izvori struje za zavarivanje bazirani na inverterskoj tehnologiji su pokretači tih promjena [15].

Inverterski izvori struje za zavarivanje razvijeni su korištenjem visokoenergetskih poluvodiča kao što su IGBT (eng. Insulated Gate Bipolar Transistor) koji omogućavaju prekidni izvor napajanja koji ima mogućnost da podnese velika strujna opterećenja izazvana postupkom zavarivanja. Inverter je elektronički sklop koji prije transformacije pretvara izmjeničnu u istosmjernu struju. Glavni razlog stavljanja invertera prije transformatora je u tome što broj zavoja transformatora linearno opada s povećanjem frekvencije na ulazu što za posljedicu ima korištenje dimenzijski malih izvora struje. Nakon pretvaranja struje, tranzistorske sklopke brzim prebacivanjem iz područja zapiranja u područje zasićenja stvaraju visokofrekventni napon (10000 do 20000 Hz). Prolaskom ove struje kroz transformator nastaje izmjenična struja niskog napona, ali vrlo visoke jakosti struje. Slika 4 prikazuje blok dijagram punovalnog ispravljača s Graetzovim spojem na kojem je vidljiva građa inverterskih izvora struje za zavarivanje [12].



Slika 4. Blok dijagram inverterskog izvora struje za zavarivanje [12]

Inverterski izvori struje za zavarivanje imaju: visoku iskoristivost (oko 90%), vrlo preciznu regulaciju izlaznih parametara, zaštitu od preopterećenja, mogućnost promjene parametara

zavarivanja tijekom rada u realnom vremenu, kontrolu impulsne struje (jakost, gustoća struje, omjer na kojem je polu struja duže zadržana, frekvencija impulsa te uzlazna i silazna karakteristika), napredniju kontrolu dodavanjem novog programskog paketa, brže vrijeme reakcije u odnosu na jednostavne transformatore i ispravljače te su manjih dimenzija nego transformatori [12].

Inverterski izvori struje za zavarivanje imaju mogućnost zavarivanja zavarenih spojeva visoke kvalitete različitim postupcima zavarivanja na istom uređaju. Tako se na istom uređaju može zavarivati REL, MAG, MIG, TIG postupcima te je moguće i žljebljenje. Zbog svoje efikasnosti inverterski izvori struje za zavarivanje omogućavaju uštede električne energije [16].

#### *2.1.1.2. Podešavanje parametara MAG zavarivanja*

Izvori struje za MAG zavarivanje najčešće nemaju direktno podešavanje jakosti struje zavarivanja nego se ona mijenja podešavanjem brzine dobavljanja žice. Podešavanjem napona mijenja se duljina električnog luka i način prijenosa metala u električnom luku. Podešavanje parametara MAG zavarivanja moguće je izvesti na dva načina: klasično ili pomoću sinergijskih krivulja. Klasično podešavanje parametara MAG zavarivanja odnosi se na odvojeno podešavanje brzine dobavljanja žice (samim time i jakosti struje zavarivanja) i napona. Podešavanje parametara preko sinergijskih krivulja uvelike olakšava podešavanje parametara zavarivanja jer se podešavanjem brzine dobavljanja žice podešavaju i ostali parametri zavarivanja. Parametri se podešavaju u ovisnosti o vrsti osnovnog materijala te ovisno o zaštitnom plinu [17,18].

Podešavanje parametara pomoću sinergijskih krivulja uvelike olakšava MAG zavarivanje. Sinergijska kontrola bazira se na podešavanju preko samo jednog potencijometra (eng. one knob control) te omogućava zavarivaču da odabirom jednog parametra zavarivanja automatski podesi i ostale parametre. Nakon odabira zaštitnog plina i vrste osnovnog materijala te podešavanja brzine dodavanja žice, ostali parametri se podešavaju automatski. Sinergijske krivulje su unaprijed definirane krivulje koje međusobno povezuju parametre zavarivanja. Sinergijske krivulje dolaze pohranjene u memoriji izvora struje za zavarivanje. Moguće ih je naknadno mijenjati te dodavati nove. Podešavanje parametara bazirano na sinergijskim krivuljama koristi se i kod konvencionalnog MAG zavarivanja i kod impulsnog MAG zavarivanja. Kod konvencionalnog MAG zavarivanja pomoću sinergijskih krivulja napon se podešava odabirom brzine dobavljanja žice. Kod impulsnog MAG zavarivanja

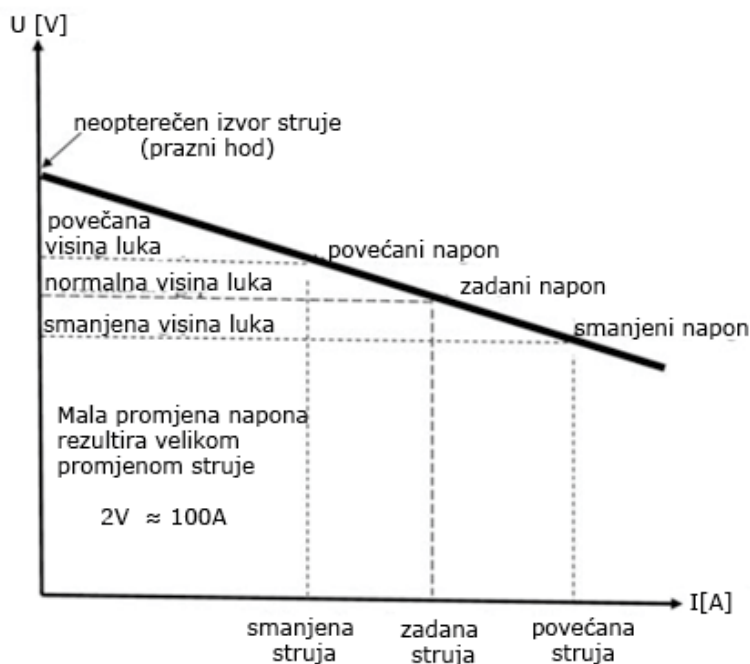
podešavanjem parametara osnovnog i dodatnog materijala te zaštitnog plina podešavaju se napon i svi ostali parametri impulsa [18,19,20].

### 2.1.1.3. Pregled statičkih i dinamičkih karakteristika izvora napajanja

Kod MAG zavarivanja najčešće je korišten izvor istosmjerne struje gdje je polaritet elektrode pozitivan pri čemu se postiže stabilan električni luk. Primjena konstantnog negativnog polariteta na žici kod zavarivanja metalnom taljivom elektrodom u zaštiti plina nije moguća zbog nestabilnog električnog luka, rasprskavanja te loše penetracije i kvašenja što je neprihvatljivo kod uobičajenih zavarivačkih operacija [21].

Dinamička karakteristika (odnos trenutne vrijednosti napona i trenutne vrijednosti struje) i statička karakteristika (odnos iznosa srednje vrijednosti struje i iznosa srednje vrijednosti napona) izvora napajanja može imati značajni utjecaj na postupak zavarivanja [22].

Kod konvencionalnih izvora napajanja zavarivanja uobičajeno se koristi ravna strujna karakteristika kako bi se postiglo optimalno održavanje luka i zadržao konstantni iznos struje uz bilo koju promjenu napona prilikom zavarivanja. Slika 5 prikazuje ravnu strujno–naponsku karakteristiku izvora napajanja. Napon takvog ispravljača je približno konstantan pri gotovo svakoj promjeni struje zavarivanja. Ovakva karakteristika izvora uz konstantnu brzinu dovođenja žice omogućava održavanje konstantne dužine luka (engl. self-adjusting arc) jer na visinu luka utječe uređaj, a ne čovjek.



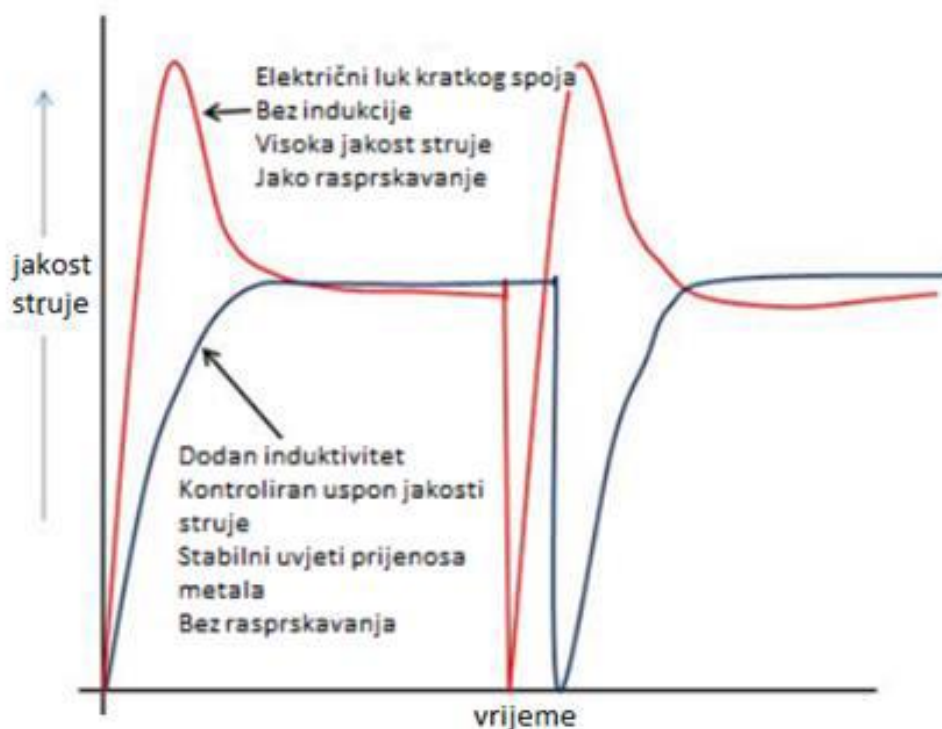
**Slika 5. Statička karakteristika izvora struje uz održavanje konstantnog napona prilikom MAG zavarivanja [20]**



Uz povećanje visine električnog luka, vrijednost napona poraste i vrijednost struje padne. Struja je također kontrolirana brzinom dovođenja žice, pa će se zbog toga žica sporije taliti, a visina luka će se smanjiti na originalnu visinu. Ako se visina luka smanji, vrijednost napona padne, a vrijednost struje poraste. Zbog veće vrijednosti struje žica se brže tali dok se električni luk ne produlji, tj. vrati na predefiniranu visinu. Statičke karakteristike su predodređene konstrukcijom samog izvora napajanja i korisnik ih ne može mijenjati.

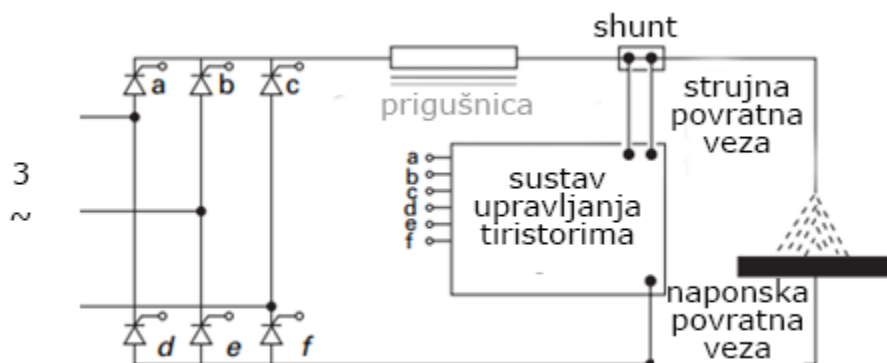
Dinamička karakteristika prikazuje trenutne promjene napona i struje tijekom postupka zavarivanja zbog analiziranja ponašanja električnog luka prilikom formiranja i odvajanja rastaljene kapljice dodatnog materijala. Trenutne vrijednosti struje i napona tijekom prijenosa metala mjere se pomoću osciloskopa, a dobiveni graf trenutnih vrijednosti struje i napona naziva se oscilogram. Kod konvencionalnih izvora nižih cijena uobičajeno je korišten induktivitet u izvoru napajanja kako bi se postavilo ograničenje na rast struje prilikom trajanja kratkog spoja kad se radi o prijenosu metala kratkim spojevima. Induktivitet kod starijih uređaja regulira se grebenastim sklopkama, potencijometrima ili pomičnim kotvama [12].

Cilj je osigurati što ujednačeniji i prikladniji prijelaz materijala ovisno o vrsti zavarenog spoja koji se izvodi. Induktivitet je vrlo suptilan i osjetljiv parametar koji u konačnici može poboljšati ili narušiti potencijalno dobar prijenos materijala te samu uspostavu električnog luka. Slika 6 prikazuje utjecaj induktiviteta na uzlaz i silaz električnog impulsa.



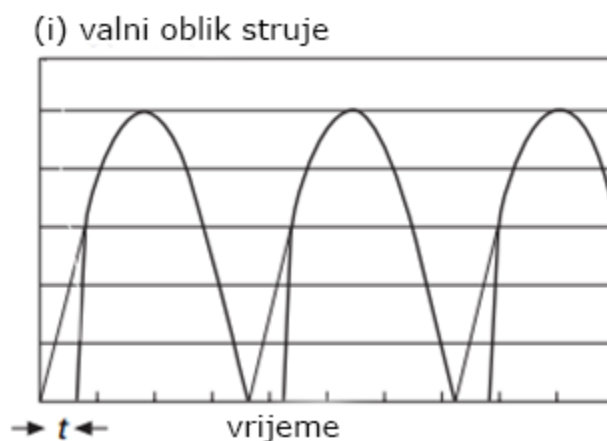
Slika 6. Utjecaj induktiviteta na uspon i silaz električnog impulsa [12]

U novije vrijeme razvojem učinske elektronike dolazi do alternativnih, elektronički upravljanih izvora koji se temelje na učinkim poluvodičkim ventilima (IGBT, MOSFET). Primjer jednog takvog izvora prikazuje slika 7.



**Slika 7. Trofazni fazno upravljivi tiristorski ispravljač u mosnom spoju [23]**

Koristeći povratnu vezu moguće je postići puno stabilniji izlaz izvora u odnosu na prethodno korištene konvencionalne izvore napajanja. Fazno upravljani ispravljač prikazan na slici 7 može biti korišten kao izvor napajanja kod DC REL, MIG/MAG, pravokutnog AC TIG, MIG/MAG i EPP zavarivanja [23]. Slika 8 prikazuje izlaz napona i struje trofaznog fazno upravljivog tiristorskog ispravljača u mosnom spoju opterećenog djelatnim trošilom.



**Slika 8. Izlaz napona i struje trofaznog fazno upravljivog tiristorskog ispravljača u mosnom spoju [23]**

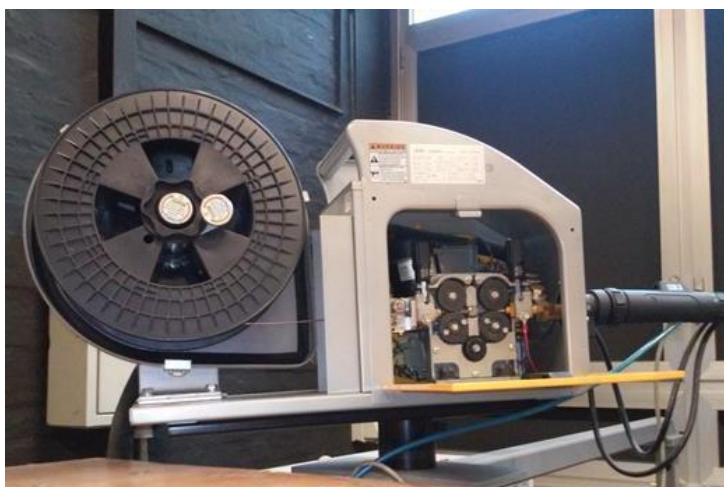
Ovisno o jačini narinute struje i napona ostvaruju se različiti prijenosi metala u električnom luku. Moderni izvori struje omogućavaju kontinuirano i brzo upravljanje iznosima struje i napona zavarivanja i tako stvaraju modificirane načine prijenosa materijala gdje se prijenos materijala električnim lukom sastoji od kombinacije više osnovnih načina prijenosa materijala

tijekom jednog radnog ciklusa. Moderni izvori struje za zavarivanje također mogu generirati struju za zavarivanje promjenjivog polariteta (engl. variable polarity - VP). To znači da se na metalnoj elektrodi izmjenjuju pozitivna i negativna perioda određenog trajanja i intenziteta. Optimalnim odnosom frekvencije i intenziteta pozitivnih i negativnih perioda postiže se stabilan prijenos metala u električnom luku koji za istu jakost struje zavarivanja postiže veći depozit nataljenog metala uz minimalno miješanje što su karakteristike koje se zahtijevaju pri navarivanju [12].

Uza sve svoje prednosti moderniji izvori napajanja koriste znatno složeniju opremu što je vidljivo u njihovoj cijeni. Za modernu opremu potrebno je poznavati područja u kojima postupci zavarivanja imaju bitno bolje karakteristike od konvencionalne opreme. U protivnom investicija u najmoderniju opremu nema smisla. Tipično je modernija oprema isplativa ako se radi o potpuno automatiziranom zavarivanju gdje se povećava produktivnost i doseže kvaliteta zavara kakva s konvencionalnom opremom nije moguća.

### **2.1.2. Sustav za dodavanje žice**

Svrha sustava za dodavanje žice je osigurati ravnomjerno, konstantno i pouzdano dovođenje žice do električnoga luka. Vrlo je važno da žica bude vođena precizno i ujednačeno jer bilo kakva promjena brzine dodavanja žice može rezultirati promjenom u zavarenome spoju. I najmanja promjena ili titranje žice može dovesti do pogrešaka u zavaru pa čak i do prestanka dodavanja žice. Izvedbe dodavača žice pružaju primjenu širokoga raspona promjera žica (0,6 – 1,6 mm), punih i praškom punjenih. Brzina dodavanja žice može biti postavljena putem digitalnih očitavanja ili kalibrirajućega sustava obilježavanja na upravljačkoj ploči [19]. Na slici 9 prikazan je sustav za dodavanje žice.



**Slika 9. Sustav za dodavanje žice [24]**

Dodavač žice može se nalaziti unutar kućišta izvora struje za zavarivanje čime se želi dobiti manji volumen uređaja, veća mobilnost i ušteda cijene proizvodnje. Danas se dodavači žice većinom montiraju izvan kućišta kao zasebna jedinica zbog prednosti poput rotacije modula s obzirom na izvor struje za zavarivanje (vrlo korisno kod većih radnih komada sa više stranica kojima je pristup otežan). Također, time je omogućena bolja preglednost namotaja žice na kolutu u slučaju pogreške pri uvođenju [12].

Za dodavanje žice najčešće se koriste dva načina [25]:

- 1) push sustav (slika 10) - žica se kontroliranom brzinom gura pomoću pogonskih kotačića kroz vodilicu žice u gorioniku do samoga mjesta zavarivanja, kontrolirana brzina osigurava se elektronički reguliranim istosmjernim motorom, siguran pogon osigurava se sa dva ili četiri pogonska kotačića koji žicu vode i guraju kroz kalibrirane utore čije dimenzije i oblik ovise o materijalu i promjeru žice, ovaj način omogućava efikasan rad sa žicama promjera 0,6 – 2,4 mm za čelike, 1,2 – 2,4 mm za aluminij i njegove legure, dodavanje žice guranjem omogućava sigurno dodavanje na udaljenostima tri do četiri metra od izvora i danas se najčešće koristi u praksi



**Slika 10. Dodavanje žice push sustavom [26]**

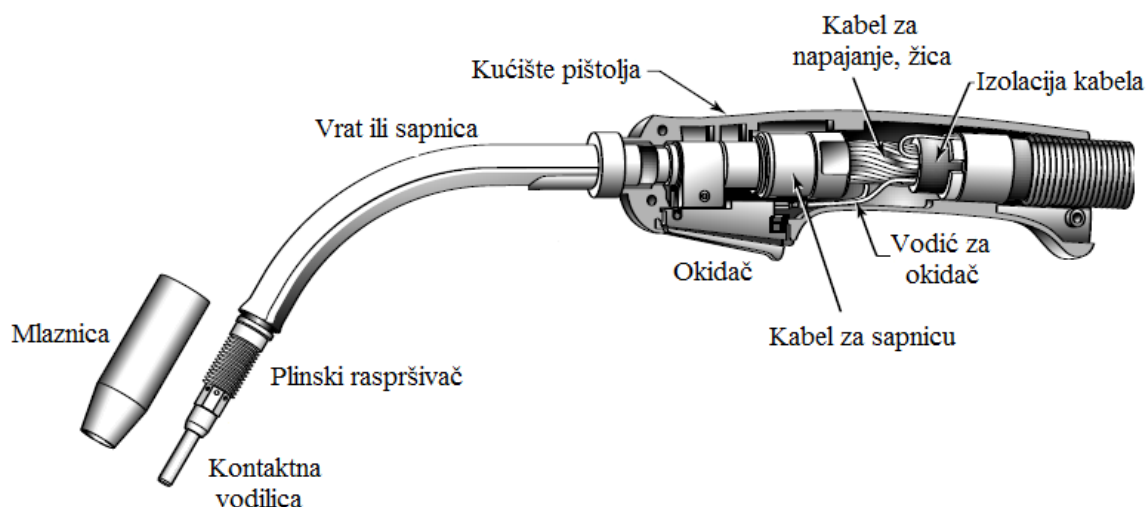
- 2) push - pull sustav (slika 11) – žica se kontroliranom brzinom gura pomoću pogonskih kotačića kroz vodilicu žice do pogonskih kotačića u gorioniku koji je vuku do mjesta zavera, u ovom slučaju drugi pogonski motor se nalazi u ručki gorionika, a po svojoj izvedbi može biti električni ili zračni, prednost ovoga sustava je stalna zategnutost žice u vodilici što omogućava sigurno dodavanje i kod žica manjih promjera (0,8 mm) i na udaljenostima do 15 m od izvora, mana sustava je njegova cijena i težina sustava gorionik/kabel, osobito kod većih struja i udaljenosti, stoga se on danas koristi uglavnom kod zavarivanja aluminija i njegovih legura na konstrukcijama gdje druga rješenja nisu moguća.



Slika 11. Dobava žice push - pull sustavom [26]

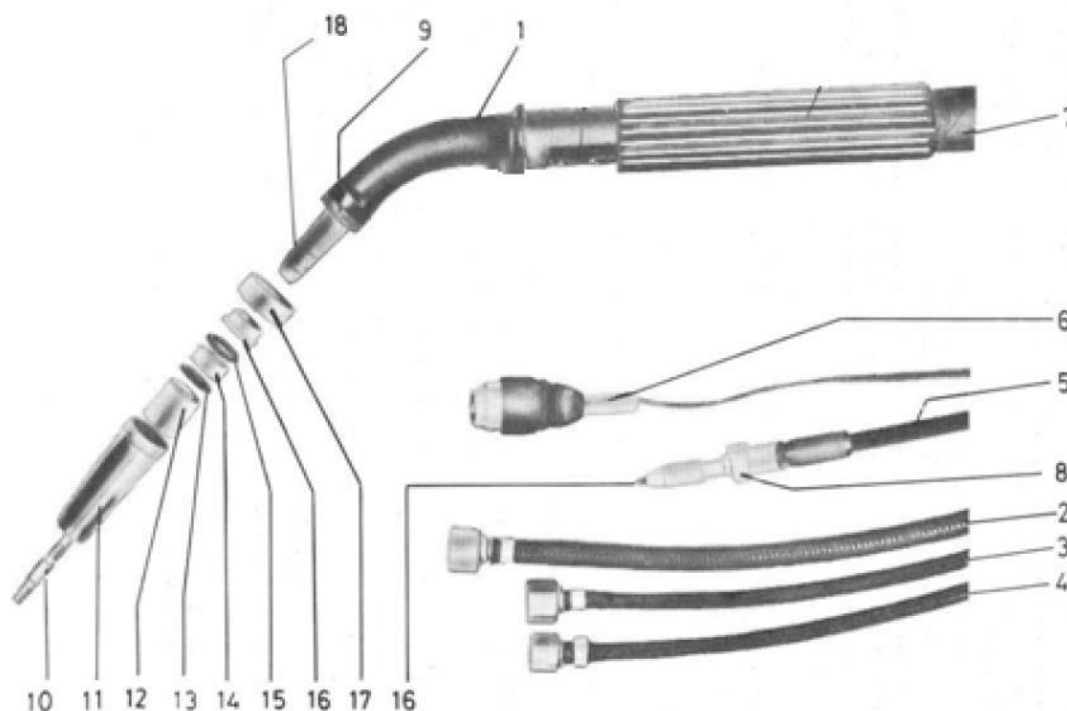
### 2.1.3. Pištolj za zavarivanje

Pištolj za MAG zavarivanje osnovni je alat zavarivača kod MAG zavarivanja. Sama konstrukcija pištolja ovisi o jačini uređaja, vrsti zavarivanja (poluautomatsko, automatizirano, robotizirano) te kako će se dovoditi žica u sami pištolj. Pištolji se izrađuju u dvije osnovne varijante. Za struje od 100 do 500 A proizvode se pištolji sa zračnim hlađenjem, dok se za struje od 200 do 600 A proizvode pištolji s vodenim hlađenjem. Pištolj kao jedna od komponenti opreme za zavarivanje spada u potrošni materijali tj. u pištolju postoje pojedini dijelovi koji su potrošni. Ovisno o uvjetima rada, dijelovi se mijenjaju po potrebi. Pištolj čine dijelovi prikazani na slici 12. Kontaktne vodilice pištolja nalazi se skoro u električnom luku što zahtijeva izdržljivost na mehanička i toplinska naprezanja. Temperature dostižu i do 700 °C u blizini kontaktne vodilice. Vodilica je napravljena od bakra. Unutrašnjost kontaktne vodilice bitna je zbog toga što žica mora lako proći kroz nju kako bi se postigao što bolji električni luk, ali i stabilnost radi boljšeg zavara. Vrste i veličine kontaktne vodilice ovise o pištolju, žici itd. [3,10,27,28].



Slika 12. Komponente pištolja za zavarivanje sa zračnim hlađenjem [27]

Mlaznica ili plinska sapnica usmjerava plin u zonu zavarivanja. Postoji više vrsta mlaznica ovisno o pištolju, načinu zavarivanja, plinu itd. Kroz pištolj prolazi još i žica, kabel za napajanje (pozitivan pol), zaštitni plin, upravljački signal, a u nekim pištoljima koji se hlade tekućinama prolazi i voda. Pištolji koji su hlađeni zrakom više se preporučaju zbog jednostavnosti, dok su pištolji hlađeni vodom kompaktiji i obično se koriste za nazivne struje zavarivanja od 600 A. Slika 13 prikazuje izvedbu te dijelove pištolja hlađenog vodom.

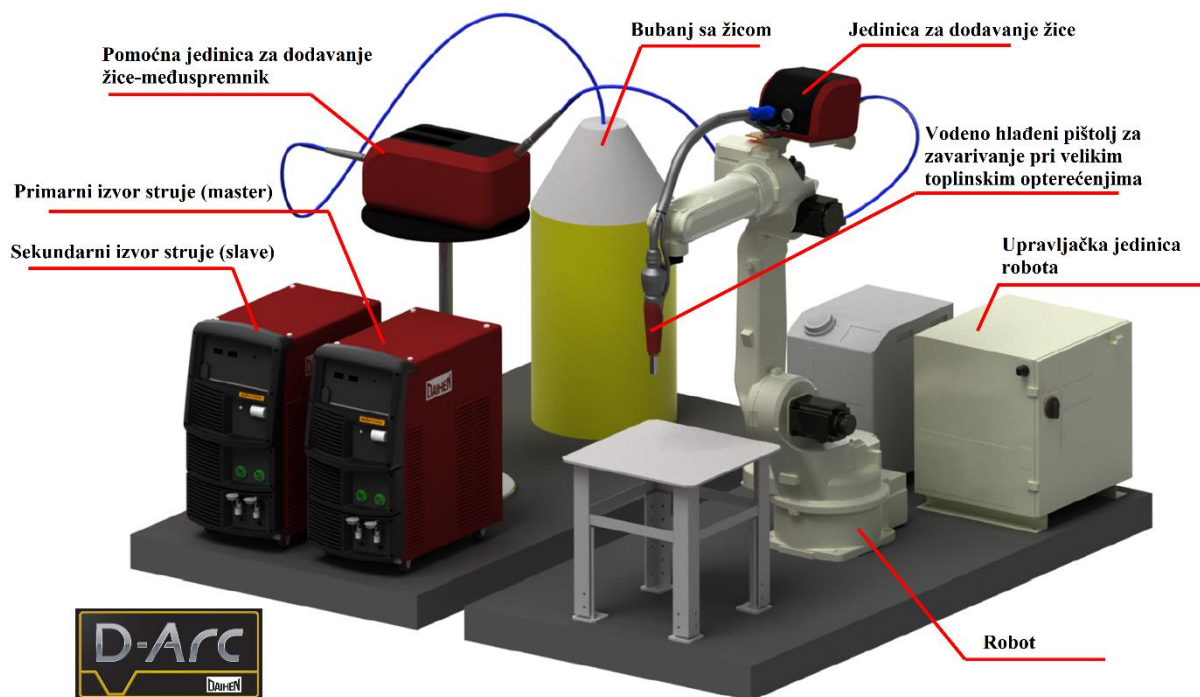


**Slika 13. Komponente pištolja s vodenim hlađenjem [29]**

- |                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| 1. Sapnica ili vrat pištolja        | 11. Mlaznica ili sapnica za plin                      |
| 2. Vodič struje s vodenim hlađenjem | 12. Izolacijski prsten                                |
| 3. Crijevo za rashladnu vodu        | 13. Brtveni prsten                                    |
| 4. Crijevo za dovod plina           | 14. Prsten  |
| 5. Crijevo za dovođenje žice        | 15. Tlačni prsten                                     |
| 6. Kontrolni kabel                  | 16. Prsten za povezivanje                             |
| 7. Zaštitno crijevo                 | 17. Umetak za dovođenje žice za zavarivanje aluminija |
| 8. Ulazna vodilica za žicu          | 18. Plinska kontaktna vodilica                        |
| 9. Prsten                           |   |
| 10. Kontakt na vodilica             |   |

### 3. D-ARC POSTUPAK ZAVARIVANJA

D-Arc postupak je robotizirani postupak zavarivanja namijenjen zavarivanju metalnih ploča debljine do 19 mm u jednom prolazu korištenjem zakopanog električnog luka. Kako bi se omogućio željeni rezultat, D-Arc postupak koristi takozvani *tandem* proces zavarivanja i sustav dodavanja žice pomoću dva dodavača. Na slici 14 prikazana je konfiguracija visokoučinkovitog robotiziranog D-Arc sustava za zavarivanje.



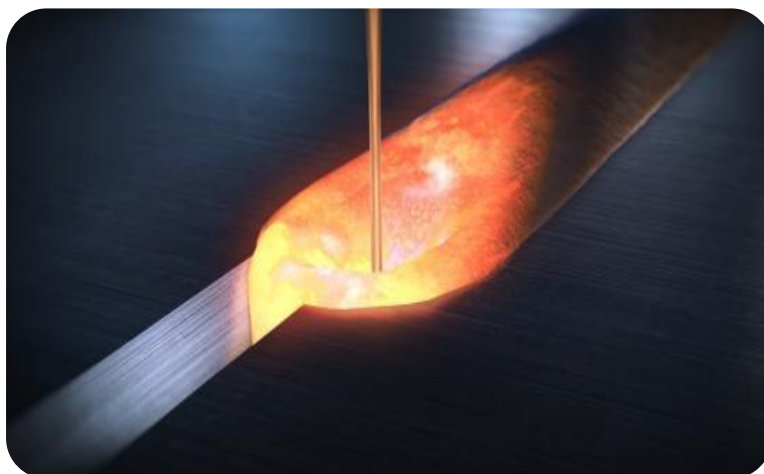
Slika 14. Konfiguracija visokoučinkovitog robotiziranog D-Arc sustava za zavarivanje [1]

Sustav uz robot čine dva izvora struje za zavarivanje koji maksimalno mogu isporučiti struju do 1000 A pri čemu je na glavni izvor struje spojeno modularno niskofrekventno upravljanje naponom kako bi se izračunala trenutna struja ovisno o odgovarajućem nagibu vanjske karakteristike. Dodavač žice s maksimalnom brzinom dodavanja žice od 100 m/min smješten je na tijelu robota i spojen zajedno sa međuspremnikom žice. Pištolj za zavarivanje hlađen je vodom i izrađen aditivnom 3D tehnologijom na bazi bakrene legure te je moguće opterećenje od 650 A pri 100 % intermitenciji.



### 3.1. Prijenos metala zakopanim električnim lukom

Zakopani električni luk (eng. buried arc) kod D-Arc postupka zavarivanja pokazao se kao učinkovito rješenje određenih problema koji se javljaju kod konvencionalnog MAG zavarivanja debelih limova kao što su potreba za zavarivanjem u više prolaza, velika količina dodatnog materijala (zbog pripreme) i velike deformacije komada. Svi ovi nedostaci mogu se eliminirati primjenom zakopanog luka u D-Arc postupku uz postizanje učinkovitog procesa i kvalitetnog zavarenog spoja. Iako nije precizirana jasna definicija podrazumijeva se da je to fenomen pri kojem je električni luk zajedno sa vrhom rastaljene žice postavljen ispod razine površine rastaljenog metala zvara kao što je prikazano na slikama 15 i 16. Obzirom na to da je izvor topline postavljen dublje u odnosu na konvencionalan električni luk može se postići veća penetracija što ovaj modalitet električnog luka čini prikladnim za zavarivanje debljih materijala [1].



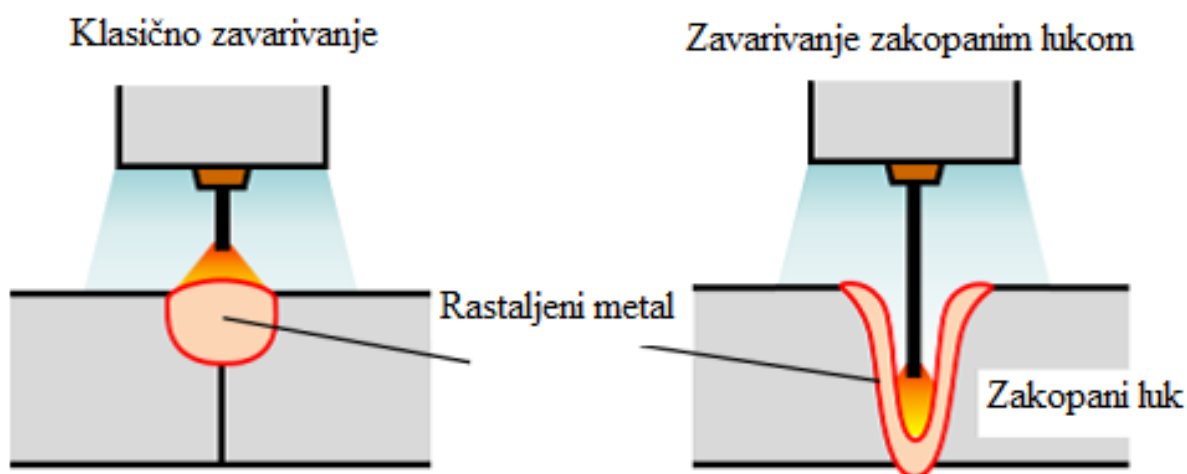
Slika 15. Zakopani električni luk, pogled izvana [1]





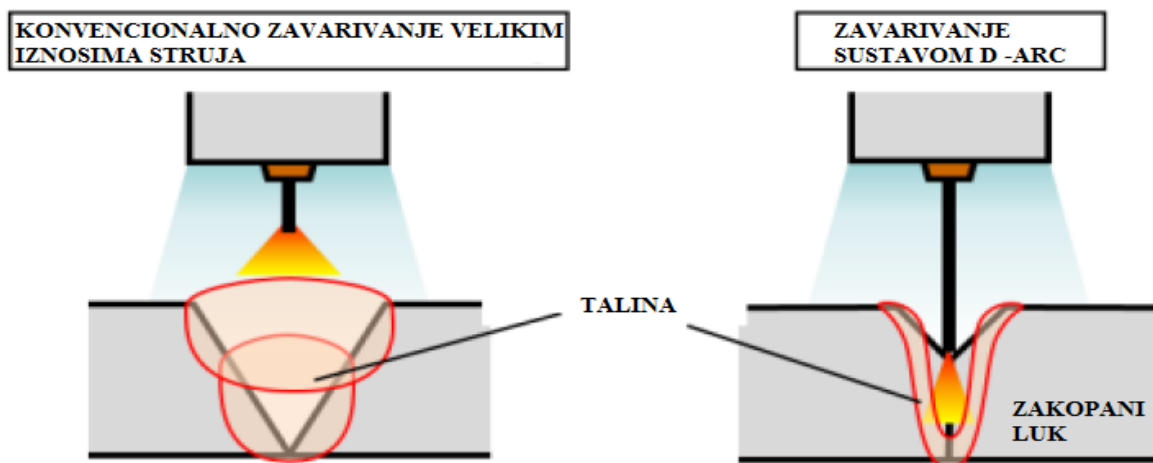
**Slika 16. Zakopani električni luk, prikaz procesa iznutra [1]**

U praksi, konvencionalni električni luk održava se iznad rastaljenog metala. Tako je zagrijavan samo vrh rastaljenog metala i to je razlog ograničene penetracije. Zbog toga je za zavarivanje debelih materijala potrebna precizna priprema žlijeba, te se zavarivanje vrši u više prolaza. To znači da je potrebna veća količina dodatnog materijala, više vremena zbog hlađenja u međuprolazima, te dolazi do većih deformacija. Glavna razlika između konvencionalnog zavarivanja i zavarivanja zakopanim lukom prikazana je na slici 17.



**Slika 17. Razlika između konvencionalnog zavarivanja i zavarivanja zakopanim lukom [2]**

Također, i priprema spoja na debljim materijalima jednostavnija je i kraća kod primjene zakopanog luka nego kod višeprolaznog zavarivanja. Budući da je pripremljeni spoj *manjih/užih* dimenzija, manja je i potrošnja žice. Na slici 18 prikazana je razlika u pripremi spoja kod konvencionalnog zavarivanja i zavarivanja zakopanim lukom (D-Arc postupak).



**Slika 18. Razlika u pripremi spoja [2]**

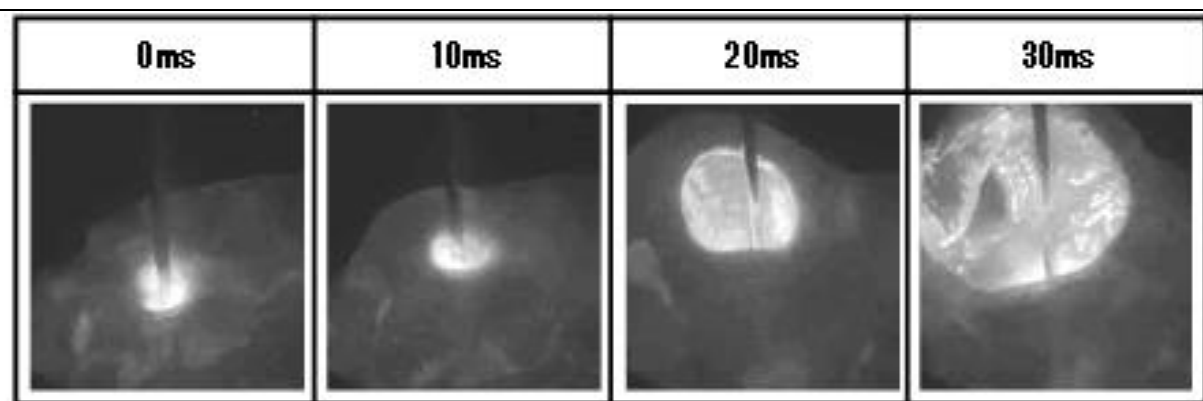
Zakopani luk podložan je nestabilnom ponašanju i povremenoj pojavi kratkih spojeva tako da je stabilizacija samog procesa vrlo zahtjevna posebno u području jakih struja. Iz tog razloga i ograničenja u primjeni zakopani luk nije u prošlosti često upotrebljavan u proizvodnji.

### **3.1.1. Stabilizacija zakopanog luka visoke struje**

Slika 19 prikazuje rezultate snimanja zakopanog luka pri strujama višim od 500A pri čemu je korišten izvor struje sa ravnom karakteristikom (CV). Otvaranje šupljine unutar rastaljenog metala (nazvanog zakopani prostor) prilično je nestabilno i pokazuje intenzivno gibanje taline. Pretpostavlja se da je uzrok ovakvog ponašanja u ponavljajućem ciklusu kako slijedi:

- 1) rastaljeni metal na bočnom zidu zakopanog prostora približava se žici
- 2) da bi se održala duljina luka dolazi do porasta struje
- 3) sile u luku rastu u dubljem dijelu taline te dolazi do brzog širenja otvora.

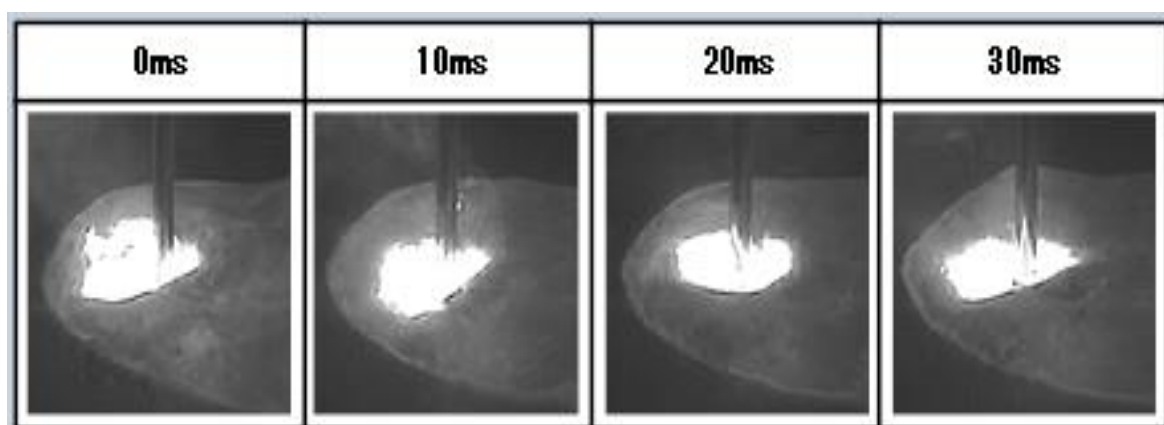
Drugim riječima, smatra se da zakopani luk postaje nestabilan u području visoke struje ako nema odgovarajućeg tlaka na rastaljeni metal bočnog zida zakopanog prostora što je posebno naglašeno blizu površine taline. Iz tog razloga razvijen je valni oblik struje koji kontinuirano pridržava rastaljeni zid zakopanog prostora uz cikličko ponavljanje vrijednosti struje i napona. Takav valni oblik je u biti niskofrekventno modulirana kontrola napona kojim se periodično mijenja oblik izlaznog napona [1]. Zakopani luk s takvom vrstom kontrole prikazan je na slici 20, dok su u tablici 1 dani parametri zavarivanja za oba slučaja (slike 19 i 20).



Slika 19. Nestabilno ponašanje zakopanog luka [1]

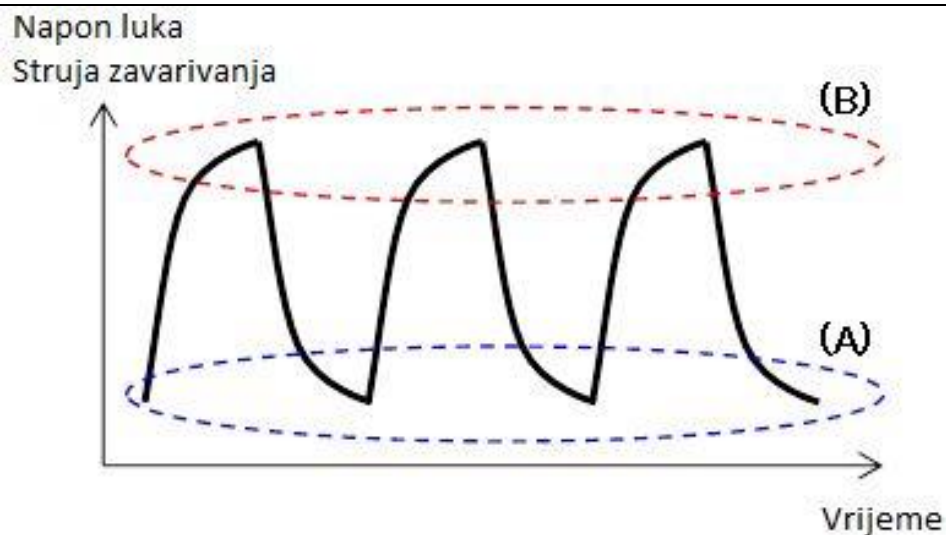
Tablica 1. Parametri zavarivanja kod nestabilnog i stabilnog zakopanog luka [1]

Parametri zavarivanja	Struja A	Napon V	Brzina cm/min	Promjer žice mm	Zaštitni plin CO <sub>2</sub> (L/min)
Vrijednosti	570	48	30	1,2	30



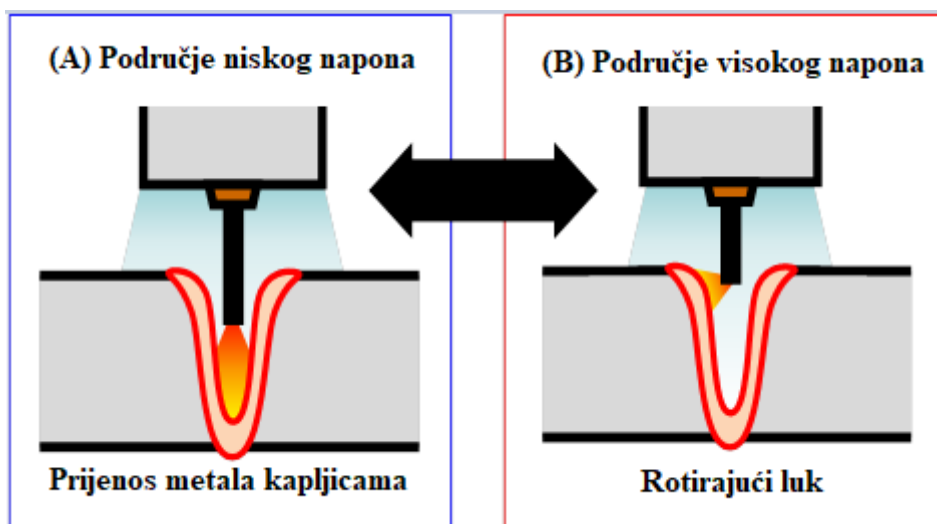
Slika 20. Ponašanje stabiliziranog zakopanog luka pomoću niskofrekventno modulirane kontrole napona [1]

Slika 21 prikazuje valni oblik struje i napona pri niskofrekventno moduliranoj kontroli napona. Namješteni napon mijenja se frekvencijom 100Hz pri čemu se isto mijenja i struja ovisno o opterećenju na sekundarnoj strani izvora struje za zavarivanje.



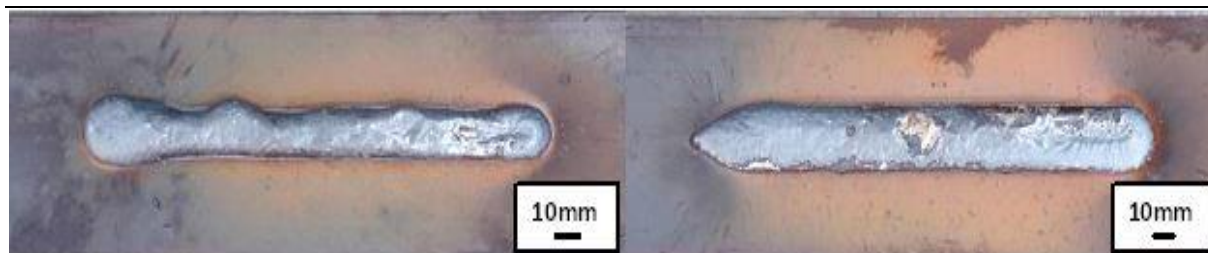
Slika 21. Prikaz valnog oblika struje [1]

Isprekidana linija (A) prikazuje područje niskog, a linija (B) visokog napona. U području (A) žica je postavljena dublje u talinu pri čemu se tali dno šupljine, a prijenos metala je u obliku kapljice. S druge strane, u području (B), vrh elektrode je postavljen relativno pliće pri čemu se luk uspostavlja na zidove šupljine. Rastaljeni metal na zidnoj stijenci zakopanog prostora postisnut je od strane luka pri čemu se održava rotirajući luk. Slika 22 prikazuje ponašanje luka označeno isprekidanom linijom (A) i (B) na slici 21.



Slika 22. Shematski prikaz ponašanja luka [1]

Kombinacijom ova dva načina rada ponašanje luka i taline se stabilizira kako je prikazano na slici 20 dok se na slici 23 vidi poboljšani izgled zavora.



**Slika 23. Usporedba izgleda zavora: Konvencionalni zakopani luk (lijevo) i primjena niskofrekventno modulirane kontrole napona (desno) [1]**

#### 4. NEPRAVILNOSTI (GREŠKE) U ZAVARENOM SPOJU

Moguće nepravilnosti koje se javljaju u zavarenom spoju dijele se na: konstrukcijske nepravilnosti, nepravilnosti povezane s procesom zavarivanja i metalurške nepravilnosti. Konstrukcijske nepravilnosti odnose se na odabir nepravilnog oblika zavarenog spoja za određenu primjenu i neželjene promjene u poprečnom presjeku spoja [30].

Nepravilnosti povezane s procesom zavarivanja uključuju:

- ugorine: oštre udubine uz zavar
- uključine troske: nemetalne uključine zarobljene u metalu zavara ili između metala zavara i osnovnog materijala
- porozitet: nastaje od zaostalog plina tijekom zavarivanja koji je ostao zarobljen prilikom skrućivanja u metalu zavara
- preklop: ispruženje metala zavara iznad lica zavara ili ispod korijena zavara
- uključci volframa: čestice volframove elektrode u metalu zavara
- ostaci potpornog materijala za izradu korijena zavara
- uključci oksida: čestice površinskih oksida koje se nisu otopile i nalaze se u metalu zavara
- naljepljivanje: stanje u kojem je metal zavara loše povezan s osnovnim materijalom
- nepotpuna penetracija: stanje u kojem je penetracija manja od zadane
- krateri: udubine u zavaru
- progaranje osnovnog materijala: uzrokovano prevelikim unosom topline
- onečišćenje kapljicama metala: uzrokovano rasprskavanjem prilikom zavarivanja
- nedovoljni provar korijena.

Metalurške nepravilnosti uključuju:

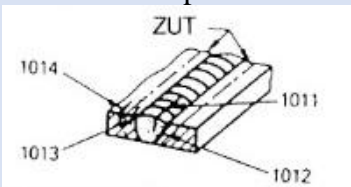
- pukotine
- plinski uključci: mjesta vodika u metalu zavara (pore)
- segregacije: uzrokovano nejednolikom distribucijom nečistoća ili legirajućih elemenata, stvaraju pukotine i slaba mjesta pri opterećenju.

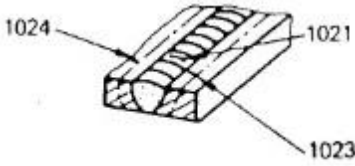
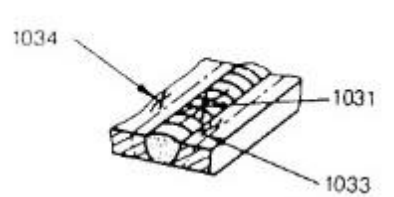
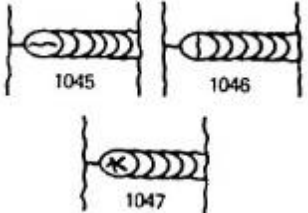
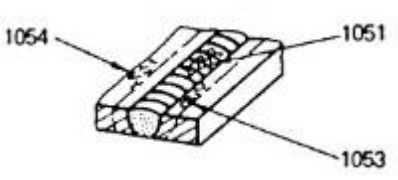
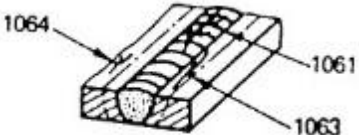
Navedene pogreške ovise uglavnom o izabranom procesu zavarivanja, tipu zavara, materijalu i radnim i okolišnim uvjetima. Kod MAG zavarivanja, najčešće greške koje se javljaju su porozitet, nepotpuna penetracija i naljepljivanje [30].

#### 4.1. Pukotine

Pukotine se smatraju najopasnijim pogreškama u zavarenom spoju i u pravilu nisu dopuštene. Zbog njihove geometrije (dvije dimenzije izrazito velike u odnosu na treću, oštri rubovi, nepovoljni položaji) nosivi presjek zavarenog spoja, a time i čvrstoća spoja, bitno se smanjuje, osobito ako su položene poprijeko na smjer naprezanja. Pukotine spadaju među pogreške koje se najviše obrađuju, prvenstveno zbog toga što je veći broj otkazivanja konstrukcija nastao njihovom naknadnom pojavom, zbog pogrešaka u fazama prije ili nakon nastanka zavarenog spoja. Tablica 2 prikazuje nazive slike i opise pogrešaka iz skupine pukotina prema normi HRN EN ISO 6520 [31].

**Tablica 2. Pukotine u zavarenom spoju [31,32]**

Naziv i prikaz	Oznaka	Opis
Pukotina	100	Pukotine su mjestimično razdvojen materijal u zavarenom spoju zbog loma nastalog utjecajem zavarivanja
Mikropukotina	1001	Mikropukotina je sitna, mikroskopom vidljiva pukotina
Uzdužne pukotine 	101 1011 1012 1013 1014	Uzdužne pukotine su one koje se protežu uglavnom, uzdužno na zavar, a mogu biti: u zavaru, na granici pretaljivanja, u zoni utjecaja topline (ZUT), izvan ZUT-a u osnovnom materijalu

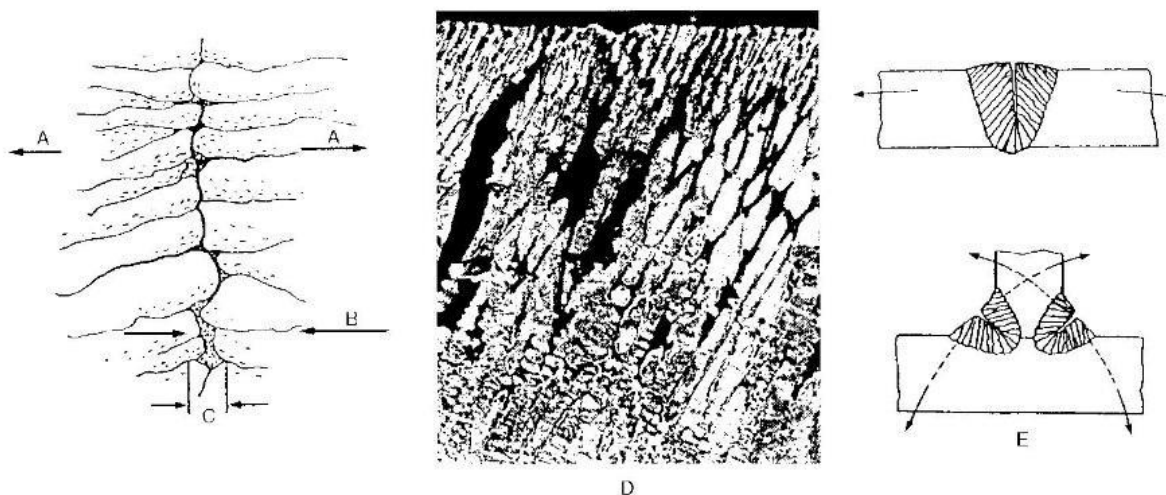
<p>Poprečne pukotine</p> 	<p>102</p> <p>1021</p> <p>1023</p> <p>1024</p>	<p>Poprečne pukotine su one koje se protežu poprečno na os zavora, a mogu biti: u zavoru, u zoni utjecaja topline (ZUT), izvan ZUT-a u osnovnom materijalu</p>
<p>Pukotine zvjezdastog oblika</p> 	<p>103</p> <p>1031</p> <p>1033</p> <p>1034</p>	<p>Pukotine zvjezdastog oblika su one koje polaze iz jednog mjesta i zrakasto se rasprostiru, a mogu biti: u zavoru, u zoni utjecaja topline (ZUT), izvan ZUT-a u osnovnom materijalu</p>
<p>Pukotine u završnom krateru</p> 	<p>104</p> <p>1045</p> <p>1046</p> <p>1047</p>	<p>Pukotine u završnom krateru mogu biti oblika: uzdužno u pravcu zavora, poprečno na zavar, zvjezdastog oblika</p>
<p>Pukotine u odvojenim skupinama</p> 	<p>105</p> <p>1051</p> <p>1053</p> <p>1054</p>	<p>Pukotine u odvojenim skupinama koje nisu povezane, a mogu biti: u zavoru, u zoni utjecaja topline (ZUT), izvan ZUT-a u osnovnom materijalu</p>
<p>Razgranate pukotine</p> 	<p>106</p> <p>1061</p> <p>1063</p> <p>1064</p>	<p>Razgranate pukotine međusobno su ovisne i polaze iz jedne zajedničke pukotine. Razlikuju se od pukotina pod 103 i 105, a mogu biti: u zavoru, u zoni utjecaja topline (ZUT), izvan ZUT-a u osnovnom materijalu</p>

#### 4.1.1. Tople pukotine

Tople pukotine kod zavarivanja nastaju u temperaturnom području od 1200 °C do 900 °C tijekom hlađenja taline do čvrstog stanja. Prostiru se po granicama zrna materijala, najčešće po dužini u sredini zavora, ali moguće su i u zoni utjecaja topline. Glavni uzrok nastajanja toplih pukotina je gubitak sposobnosti metala zavora da izdrži naprezanja nastala skupljanjem u posljednjoj fazi skrućivanja kod visokih temperatura. Pojava toplih pukotina je posebno



vezana s nečistoćama u materijalu, legiranjem, parametrima zavarivanja, nepovoljnim oblikom žlijeba i naročito nepravilnim izborom dodatnog materijala. Materijali skloni pojavi toplih pukotina su: austenitni čelici, aluminij i njegove legure. Mehanizam nastajanja toplih pukotina može se objasniti slikom 24 [31].



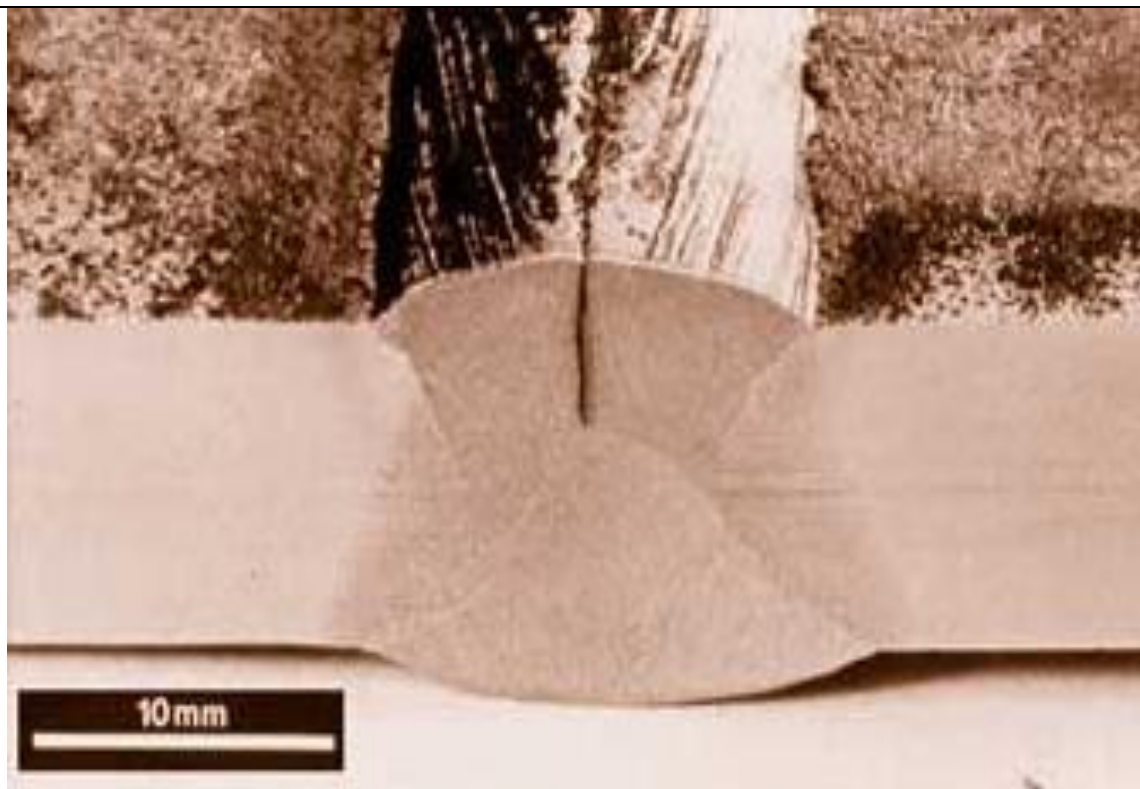
**Slika 24. Mehanizam nastajanja toplih pukotina [31]**

Opis slike 24:

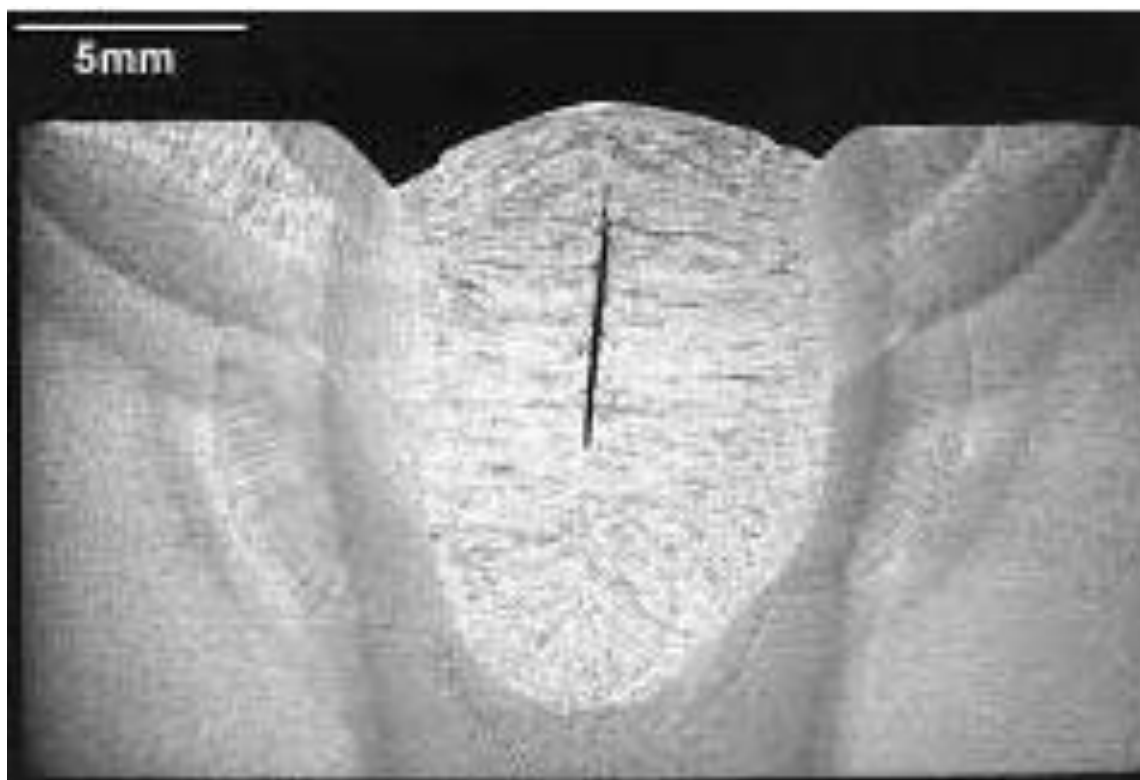
- A Pravac skupljanja metala zavarom kod skrućivanja
- B Pravac skrućivanja metala zavarom
- C Preostala talina na granici zrna
- D Tople pukotine - mikrostruktura, austenitni metal zavarom
- E Pravci opiranja osnovnog materijala skupljanju zavarom

- Skrućivanje zavarom počinje od hladnih stranica žlijeba prema sredini zavarom, a talina popunjava razdvojeni dio (B)
- u završnoj fazi skrućivanja preostaje tanki film taline između zrna skrućenog metala (C)
- područje skrućenog materijala skuplja se u smjeru suprotnom od pravca skrućivanja stvarajući velika naprezanja (A)
- ako u procesu između skupljanja i skrućivanja, nadvlada skupljanje, zrna materijala ostat će razdvojena u toplom stanju - topla pukotina (E) [31].

Slika 25 prikazuje toplu pukotinu na licu zavarom, a slika 26 toplu pukotinu ispod površine zavarom.



Slika 25. Topla pukotina na licu zavora [33]



Slika 26. Topla pukotina ispod površine zavora [34]

---

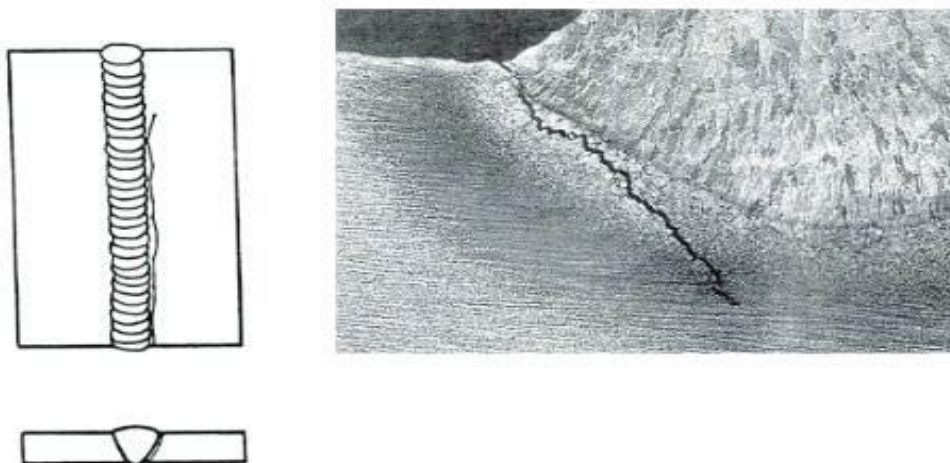
#### **4.1.2. Hladne pukotine**

Hladne pukotine nastaju nakon zavarivanja na temperaturi nižoj od 300 °C. Nekad se mogu pojaviti nekoliko sati, a nekad i nekoliko dana nakon zavarivanja. Mogu biti položene uzdužno i poprečno na zavar ili na prijelazu u osnovni materijal. Također mogu biti vidljive (na površini zavora) i nevidljive u samom zavaru. Po veličini mogu biti mikropukotine koje se vide pod mikroskopom, do makropukotina koje vidimo golim okom.

Glavni uzročnici nastanka hladnih pukotina su:

- strukture metala zavora te ZUT-a, koje su osjetljive na djelovanje vodika
- prisutnost vodika u zavaru
- metal sklon otvrdnjavanju, naročito u ZUT-u
- djelovanje naprezanja nastalih skupljanjem zavora
- nepovoljan položaj uključaka u zavaru.

Mehanizam nastajanja hladnih pukotina vrlo je složen. Pojednostavljeni prikaz: vodik koji je difundirao u talinu zavora kod visokih temperatura nalazi se u stanju atoma. Pri hlađenju vodik prelazi u molekulu i skuplja se u materijalu na mjestima sitnih pogrešaka. Na tim mjestima nastaju vrlo visoki tlakovi. Njegova raspodjela ovisi o količini i tipu raznih uključaka, mikro i makro pora te njihovog rasporeda, koje se pod utjecajem visokog tlaka vodika međusobno mogu povezati u manju ili veću pukotinu, posebno kada dodatno djeluju visoka naprezanja nastala skupljanjem metala zavora ili krhko stanje otvrdnutog metala u ZUT-u. Hladne pukotine najčešće nastaju na zavarenim spojevima čelika povišene i visoke čvrstoće. Tvrdi zakaljiva struktura ovih čelika ima smanjenu istezljivost pa pod utjecajem velikih zaostalih naprezanja može doći do loma, odnosno pojave pukotina. Česte su pojave hladnih pukotina kod reparaturnih zavarivanja, uglavnom kod slabo zavarljivih čelika ili gdje su nakon zavarivanja vrlo visoka zaostala naprezanja. Vodik koji je najveći uzročnik nastajanja hladnih pukotina, dolazi u zavar razlaganjem vlage na visokim temperaturama te iz drugih nečistoća kao što su hrđa, okujina, masnoća i vlaga koje se nalaze na površini mjesta zavarivanja. Slika 27 prikazuje hladnu pukotinu u ZUT-u sučeljenog spoja [30,31].



**Slika 27. Hladna pukotina u ZUT-u sučeljenog spoja [35]**

#### **4.1.3. Izbjegavanje nastajanja pukotina**

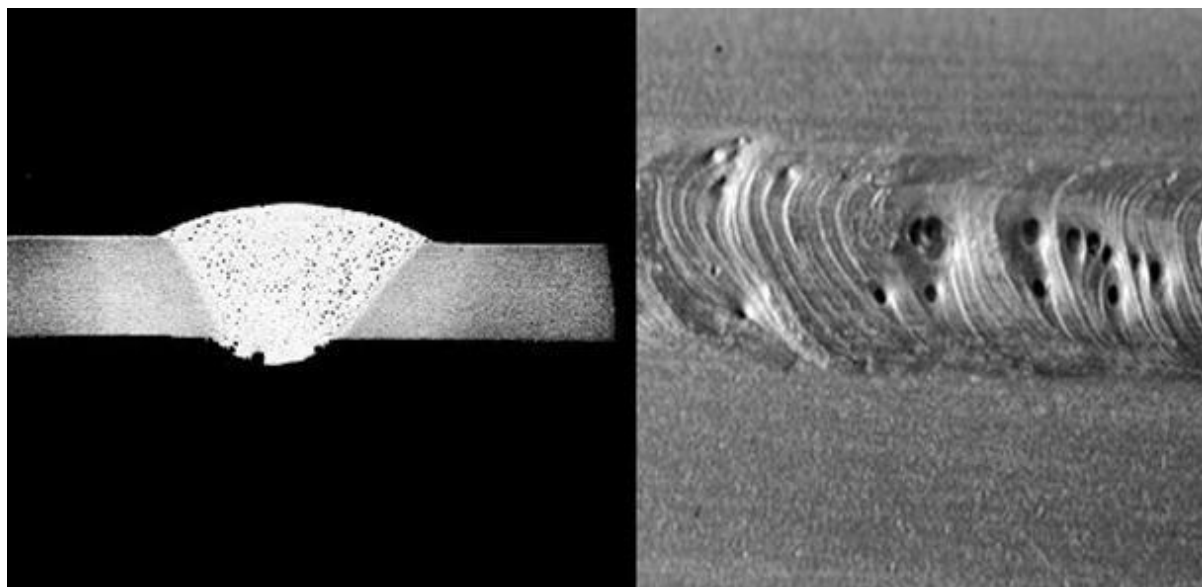
Neka od osnovnih pravila za izbjegavanje nastajanja pukotina su:

- pravilan izbor postupaka i uvjeta zavarivanja
- pravilan izbor dodatnog materijala
- sušenje elektroda i prašaka prije zavarivanja
- čistoća u pripremi spoja za zavarivanje: ne smije biti vlage, hrđe, okujine, masnoća, a površinu uz zavar treba pobrusiti
- tamo gdje se zahtijeva, izvršiti predgrijavanje te ograničiti unos topline tijekom zavarivanja
- provoditi višeslojno zavarivanje vezanim slojevima, bez velikog poprečnog gibanja vrha elektrode
- provoditi redoslijed zavarivanja koji osigurava najmanja zaostala naprezanja u zavarenom spoju
- izvoditi pravilno započinjanje i prekidanje zavarivanja, te pravilnu popunu završnog kratera
- izbjegavati privarivanje pomoćnih sredstava po površini materijala. Ako ih se ne može izbjeći, valja ih izvoditi istim načinom i pažnjom kao i glavni zavar. Skidaju se brušenjem, a ne odbijanjem
- izbjegavati oštećenja površine materijala električnim lukom i oštrim alatima
- kod zavarivanja debljih materijala, a i tamo gdje se sumnja da može doći do pojave pukotina, provodi se dodatna kontrola zavarenih spojeva nakon odžarivanja [31].

## 4.2. Šupljine – poroznost

Poroznost je uzrokovana zarobljenim česticama plina u metalu zavora. Najčešće su to dušik i vodik koji imaju veću topivost u rastaljenom nego u čvrstom stanju materijala. Tijekom skrućivanja, čestice plina nastoje izaći iz metala zavora u obliku mjehurića. Ako je brzina izlučivanja plinova manja od brzine skrućivanja metala neki od tih mjehurića ostaju zarobljeni u metalu zavora, tvoreći sitna, okom nevidljiva mjesta, a ponekad i mjesta veličine od nekoliko milimetara. Veličine i oblici šupljih mjesta ovise o količini upijenog, odnosno izlazećeg plina iz taline metala zavora i brzine skrućivanja. Štetni plinovi ulaze u talinu iz električnog luka. U električni luk dolaze iz okolne atmosfere, vlage i drugih nečistoća koje se nalaze na dodatnom materijalu i na površini osnovnog materijala na mjestu zavarivanja, razlaganjem spojeva pod utjecajem visokih temperatura. [30, 31].

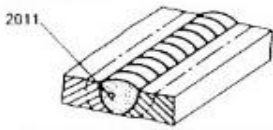

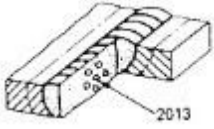


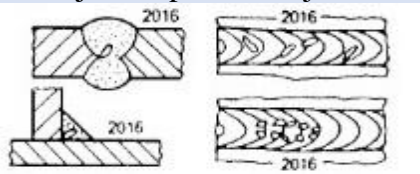
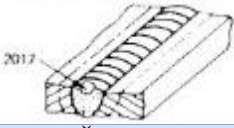
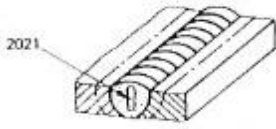
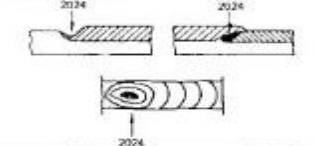
Slika 28 prikazuje poroznost u sučeljenom spoju dok su u tablici 3 prikazane vrste, nazivi i oznake poroznosti prema normi HRN EN ISO 6520.



Slika 28. Poroznost u sučeljenom spoju [36]

Tablica 3. Šupljine (poroznost) u zavarenom spoju [31,32]

Naziv i prikaz	Oznaka	Opis
Šupljine Plinski ukljucci	200 201	Šupljine bez plina Plinom ispunjene šupljine

<p>Plinski mjehurić – pora</p> 	2011	Pojedinačni plinski uključak, mjehurić ili pora kuglastog oblika u zavaru
<p>Plinski mjehurići – poroznost</p> 	2012	Više plinskih mjehurića jednoliko raspoređenih u metalu zavara
<p>Gnijezdo plinskih mjehurića</p> 	2013	Mjestimična nakupina plinskih mjehurića - pora u metalu zavara
<p>Plinski mjehurići u nizu</p> 	2014	Plinski mjehurići u nizu u metalu zavara raspoređeni duž linije osi zavara ili usporedno s osi zavara
<p>Izduženi plinski uključak</p> 	2015	Veći plinski uključak izduženog oblika u metalu zavara približno usporedan s osi zavara
<p>Cijevasti plinski uključak</p> 	2016	Plinski uključak cijevastog oblika koji se u metalu zavara rasprostire okomito ili razgranato na os zavara
<p>Površinski otvoreni mjehurići</p> 	2017	Na površini zavara vidljivi otvori - pore
<p>Šupljine</p>	202	Šupljina u zavaru nastala skrućivanjem
<p>Makrošupljina</p> 	2021	Šupljina izduženog oblika okomito na zavar, nastala u skrućivanju zavara. Može biti ispunjena plinom
<p>Mikrošupljina</p>	203	Šupljine u zavaru vidljive samo mikroskopom
<p>Međukristalna mikrošupljina</p>	2031	Međukristalne šupljine u zavaru vidljive samo mikroskopom
<p>Šupljine u završnom krateru</p> 	2024	Šupljine u završnom krateru nastaju kod prekidanja električnog luka i skrućivanjem taline. Mogu biti vidljive u krateru ili nevidljive pod nastavkom zavara

#### **4.2.1. Utjecaj poroznosti na čvrstoću zavarenog spoja**

Ovisno o broju, veličini, obliku i mjestu poroznosti te vrsti i zahtjevima na kvalitetu konstrukcije, ove pogreške različito utječu na čvrstoću zavarenog spoja. Pojedinačne pore kuglastog oblika u sučeljenom spoju nemaju većeg utjecaja na smanjenje čvrstoće zavarenog spoja. Ako su pore otvorene na površini, štetno djeluju na čvrstoću zavaru. U kutnom zavaru pore su štetne, posebno pri nižim temperaturama te kod oscilirajućih opterećenja konstrukcije. U dinamički opterećenoj konstrukciji poroznost djeluje štetno. S vremenom dolazi do pojave pukotina povezivanjem između pojedinih pora, naročito kad su blizu jedna drugoj. Ako dođe do pojave poroznosti, popravljaju se žlijebljenjem i ponovnim pravilnim zavarivanjem.

#### **4.2.2. Uzroci i izbjegavanje nastajanja poroznosti**

Uzročnici poroznosti u zavaru su:

- nečistoće i vlaga na mjestu zavarivanja i u dodatnim materijalima
- slaba zaštita procesa zavarivanja
- neispravni parametri i tehnika rada u zavarivanju.

Nečistoće su najčešće hrđa i okujina, čestice oksida ili odvojene čestice od brušenja u žlijebu. Vlaga je prisutna najčešće u oblozi elektrode, zaštitnom plinu i na površini mjesta zavarivanja, naročito kod zavarivanja po hladnijem vremenu. Previsok električni luk slabi zaštitu taline i kapljice metala u prolazu kroz luk. Nepravilno uspostavljanje i prekidanje električnog luka česti je uzročnik poroznosti u zavaru. Mjesta početka i završetka zavarivanja obično su sklona pojavi poroznosti.

Pravila za izbjegavanje nastanka poroznosti:

- čistoća mjesta zavarivanja, naročito kod visokih zahtjeva za kvalitetu zavarenih spojeva odmašćivanje spoja prije zavarivanja nehrđajućih čelika
- uklanjanje oksida neposredno prije zavarivanja aluminijske i njegovih legura
- plinskim plamenom osušiti spoj prije zavarivanja pri hladnijim vremenskim uvjetima
- pravilno uspostavljanje i prekidanje električnog luka
- pravilno održavanje visine električnog luka, nagiba pištolja ili elektrode
- ispravna količina zaštitnog plina
- sušenje obloženih elektroda i praška prije zavarivanja
- čistoća zaštitnog plina
- ispravni parametri, uređaj i tehnika rada zavarivanja [31].

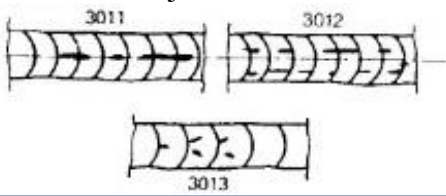


### 4.3. Čvrsti ukljucci

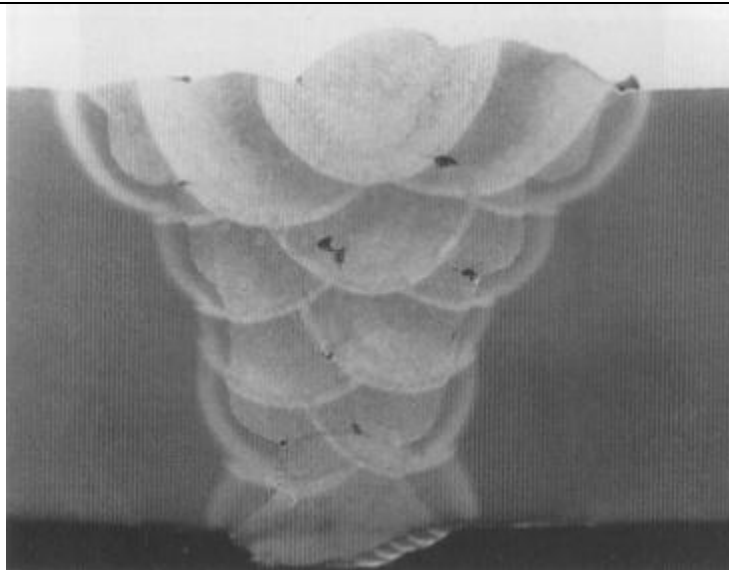
Čvrsti ukljucci, kao strano tijelo u metalu zavora, mogu biti nemetali kao troska i prašak, a mogu biti i u metalu kao npr. ukljućak volframa ili spojevi npr. oksidna kožica u zavoru aluminija. Ukljućci troske u zavoru najčešće nastaju uslijed nedovoljnog čišćenja među slojevima zavora. Troska se ponekad teško čisti, naročito u dubokim žljebovima i oštrim uglovima npr. kod vezanih slojeva ili oštećenih stranica žlijeba ili previše ispupčenog prethodnog prolaza zavora. Pravilno je ta mjesta izbrusiti prije zavarivanja sljedećeg prolaza. Ukljućci troske mogu nastati u nerazmaknutom korijenu preuskog žlijeba ili u oštrom kutu kutnog spoja, podvlačenjem taline troske pod talinu metala. Isti mogu nastati i uslijed nepravilne tehnike rada ili premale brzine zavarivanja, gdje talina troske *bježi* ispod električnog luka ispod taline metala. Osim navedenih grubih ukljućaka, u metalu zavora može biti još niz drugih sitnih ukljućaka koji su posljedica kemijskih reakcija u procesu zavarivanja kao što su: silikatni, fosfidni, sulfidni i nitridni ukljućci. Smješteni su na granicama zrna i njihova štetnost usko je povezana s nastajanjem pukotina [31].

Slika 29 prikazuje ukljućke troske kod MAG postupka zavarivanja, a tablica 4 prikazuje nazive, prikaze i opise pogrešaka tipa čvrstih ukljućaka u zavoru, prema normi HRN EN ISO 6520.

**Tablica 4. Čvrsti ukljućci u zavarenom spoju [31,32]**

Naziv i prikaz	Oznaka	Opis
Čvrsti ukljućci	300	Čvrsti strani materijal kao ukljućak u materijalu zavora
Ukljućak troske 	301 3011 3012 3013	Ukljućak troske od obloge elektrode, troske od praška i žice u metalu zavora, a može biti: u nizu, pojedinačni i ostali
Ukljućak praška, slika kao pod 301	302 3021 3022 3023	Ostatak praška zarobljen u zavoru, može biti: u nizu, pojedinačni i ostali
Ukljućak oksida	303	Metalni oksid kod skrućivanja ostao zarobljen u metalu zavora
Ukljućak oksidne kožice	3031	Ukljućak oksidne kožice ili filma metalnog oksida, najčešće kod aluminija i aluminijskih legura
Ukljućak stranog metala	304 3041 3042 3043	Ukljućci stranog metala su zarobljeni komadići druge vrste metala u metalu zavora, mogu biti: volfram, bakar i ostali metali





**Slika 29. Uključci troske kod MAG postupka zavarivanja [31]**

#### ***4.3.1. Utjecaj čvrstih uključaka na čvrstoću zavarenog spoja***

Nemetalni ukljucci kao i ukljucci stranog metala smanjuju čvrstoću zavarenog spoja zbog nehomogenosti u smanjenju presjeka materijala zavora. Na tim mjestima povećane su koncentracije naprezanja u zavoru. Utjecaj na čvrstoću zavarenog spoja ovisi o količini, obliku i veličini uključaka. Ukljucci oštih rubova djeluju kao inicijatori pukotina. Dugački ukljucci većih volumena smanjuju presjek zavora. Sitni ukljucci kuglastih oblika i manjih količina, nisu opasni i djeluju poput pora kuglastog oblika. Metalni ukljucci uglavnom su mali. Najčešći je ukljucek volframa kod TIG postupka zavarivanja aluminija i aluminijjskih legura. S metalnim ukljuccima postupa se isto kao i s nemetalnim ukljuccima u zavoru [31].

#### ***4.3.2. Izbjegavanje nastajanja čvrstih uključaka u zavoru***

Pravila izbjegavanja nastanka čvrstih uključaka:

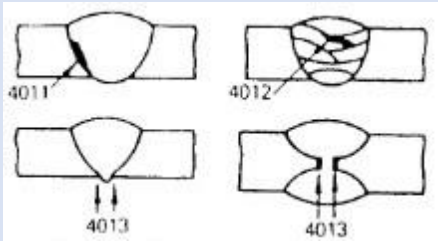
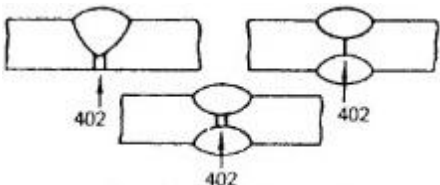
- pravilna priprema spoja, kut otvora žlijeba, parametri i tehnika rada zavarivanja
- obavezno čišćenje troske među slojevima kod višeslojnog zavarivanja
- kod oštećenja stranica žlijeba (ugorine) ili kod većeg ispupčenja predhodnog sloja, potrebno je brušenjem odstraniti oštre zareze prije zavarivanja sljedećeg prolaza
- kod zavarivanja aluminija i aluminijjskih legura neposredno prije zavarivanja potrebno je otkloniti oksidnu kožicu četkanjem ili struganjem
- kod TIG zavarivanja aluminija i aluminijjskih legura valja pripaziti da talina zavora ne dodiruje vrh volframove elektrode [31].

#### 4.4. Naljepljivanje i nedovoljni provar

Naljepljivanje je pogreška nepostojanja čvrste strukturne veze u zavarenom spoju ili navaru. Kod zavarivanja taljenjem nastaje „nalijeganje“ taline dodatnog materijala na hladnu neprotaljenu površinu spoja ili predhodnog sloja zavara. Na takvim mjestima izostaje čvrsta strukturna veza u zavarenom spoju ili navaru. Pogreška je tim neugodnija što se teško pronalazi postojećim metodama kontrole. Nedovoljni provar je nedovoljno protaljivanje (penetracija) po cijelom presjeku zavarenog spoja, odnosno neprovarivanje korijena zavara. Ove vrste pogrešaka česte su kod MAG postupka zavarivanja [31].

Tablica 5 prikazuje nazive, prikaze i opise naljepljivanja i nedovoljnog provara prema normi HRN EN ISO 6520.

**Tablica 5. Naljepljivanje i nedovoljni provar [31,32]**

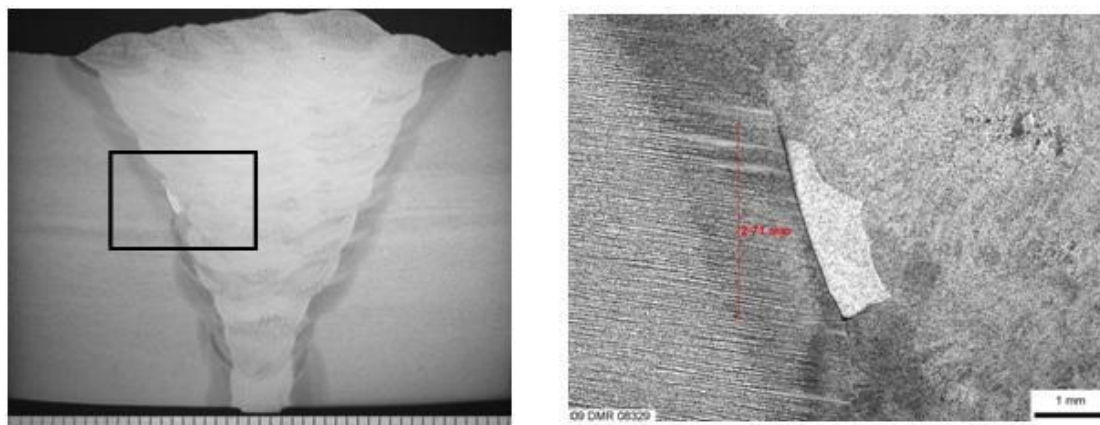
Naziv i prikaz	Oznaka	Opis
<b>Naljepljivanje</b> 	400 401 4011 4012 4013	Naljepljivanje je pogreška nepostojanja čvrste veze u zavarenom spoju. Naljepljivanje može biti: - na stranice žlijeba/kutnog spoja - između slojeva zavara - u korijenu zavara
<b>Nedovoljni provar</b> 	402	Nedovoljni provar je nedovoljno protaljivanje po cijelom presjeku zavarenog spoja, odnosno neprovarivanje korijena zavara

##### 4.4.1. Uzroci naljepljivanja

Najčešći uzroci nastajanja pogrešaka naljepljivanja su:

- prevelika brzina zavarivanja
- preveliki promjer elektrode
- premala jakost struje
- loša priprema spoja
- preoštar kut spoja
- puhanje električnog luka
- nepravilna tehnika rada [30].

Ova skupina pogrešaka često se javlja kod MAG postupka zavarivanja. Na slici 30 prikazana je pogreška naljepljivanja u sučeljenom spoju.



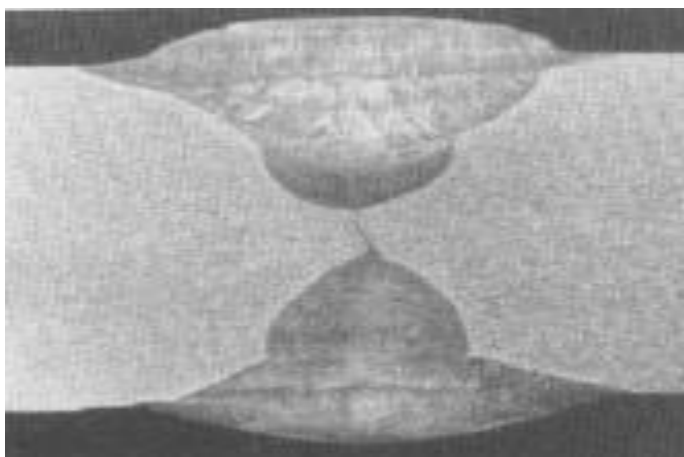
**Slika 30. Naljepljivanje u sučeljenom spoju [37]**

#### **4.4.2. Uzroci nedovoljnog provara**

Neprovaren korijen zavora (slika 31) može biti unutarnja pogreška u zavaru tamo gdje se zavarivanje izvodi obostrano ili vanjska pogreška kod zavarivanja samo s jedne strane. Vanjska pogreška može se vizualno otkriti, ali ne i u onim slučajevima gdje je onemogućen pristup korijenu zavora (cijevi manjeg promjera).

Najčešći uzroci nedovoljnog provara su:

- mala jakost struje zavarivanja
- prevelika brzina zavarivanja
- prisutnost nečistoća na površini materijala (oksidi, ulje, prljavština koja smanjuje penetraciju)
- nepravilna tehnika rada [30,31].



**Slika 31. Neprovaren korijen zavora [31]**

---

#### **4.4.3. Izbjegavanje pogrešaka naljepljivanja i nedovoljnog provara**

Preporuke za izbjegavanje nastanka pogrešaka naljepljivanja:

- zavarivanje debljih materijala MAG postupkom malim strujama treba izbjegavati. Zavarivanje u okomitom položaju ovom tehnikom je moguće uz dobro protaljivanje stranica žlijeba
- kod zavarivanja većim strujama u vodoravnom položaju, posebnu pozornost treba obratiti brzini zavarivanja, tako da talina ne bježi ispred električnog luka
- kod zavarivanja debelih materijala i debelog kutnog zavara bolje je višeslojno zavarivanje, vezanim slojevima. To se odnosi na sve postupke zavarivanja.

Preporuke za izbjegavanje nastanka pogrešaka nedovoljnog provara:

- dobra obuka zavarivača za izvođenje korijena zavara
- pravilna priprema spoja
- kod visokih zahtjeva za kvalitetu potpuno provarenog korijena zavara najbolje je zavarivanje korijena izvoditi TIG postupkom zavarivanja, na tankim i vrlo debelim materijalima
- preporuča se zavarivanje korijena zavara na keramičkoj podlozi, za što je prikladan MAG postupak s punjenom žicom
- područje gdje se korijen zavara žlijebi treba izvesti besprijeckorno do čistog metala zavara [31].

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni rad proveden je u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Rad je proveden s ciljem pronalaženja optimalne tehnologije zavarivanja debelih limova, te ujedno istraživanja mogućnosti i rezultata novo razvijenog D-Arc postupka zavarivanja. U eksperimentalnom radu zavarena su dva sučeljena spoja limova debljine 19 mm od konstrukcijskog čelika kvalitete S355.

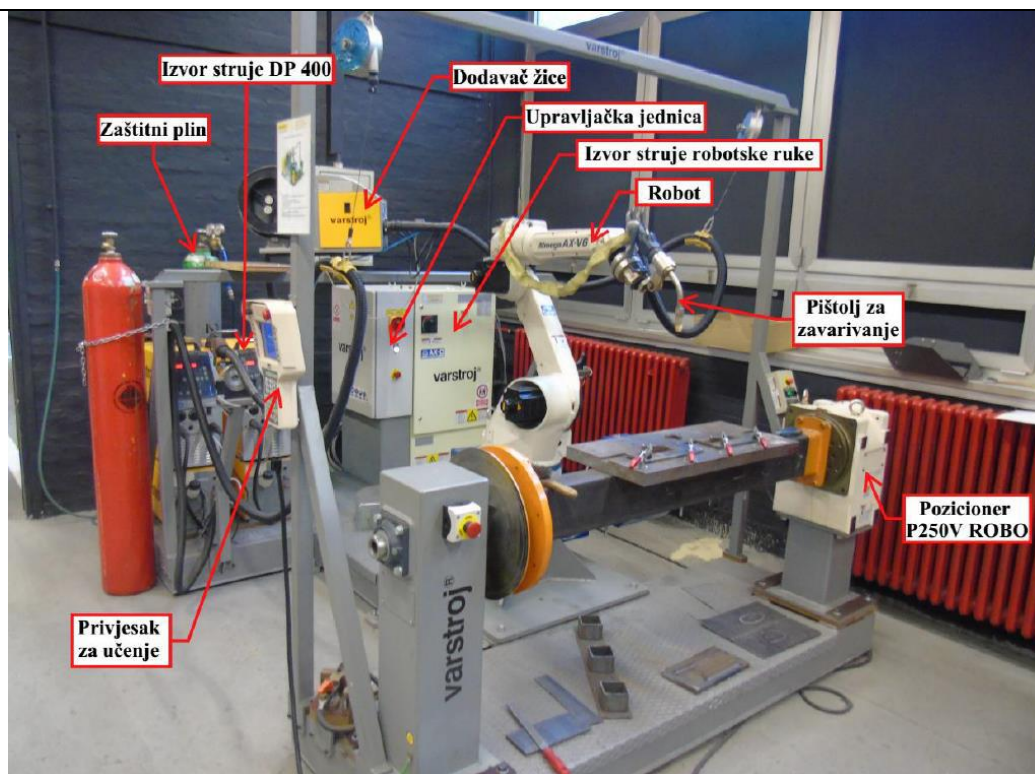
Prvi uzorak (uzorak 1) zavaren je konvencionalnim MAG postupkom zavarivanja, dok je drugi uzorak (uzorak 2) zavaren modificiranom inačicom MAG postupka koja za prijenos metala primjenjuje zakopani električni luk, D-Arc postupak. Nakon zavarivanja, na uzorcima su provedena nerazorna ispitivanja (radiografija), ispitivanja mikrostrukture i makrostrukture, te ispitivanje mehaničkih svojstava (tvrdoća).

### 5.1. Oprema za zavarivanje

Uzorak 1 zavaren je konvencionalnim MAG postupkom zavarivanja na robotskoj stanici Almega OTC AX V6, dok je uzorak 2 zavaren D-Arc postupkom na robotskoj stanici OTC FD-V20S.

#### 5.1.1. Oprema za konvencionalni MAG postupak zavarivanja

Glavni dio robotske stanice je robot OTC Almega AX V6 (slika 32) koji ima 6 rotacijskih stupnjeva slobode gibanja pomoću kojih u pripadajućem radnom prostoru može postići precizno pozicioniranje i orijentiranje pištolja za zavarivanje. Opremljen je i privjeskom za učenje pomoću kojeg se izvršava *on-line* programiranje, odnosno njime se definiraju putanje i tehnološki parametri potrebni za zavarivanje. Uz prikazane dijelove, robotska stanica ima i *shock* senzor koji reagira u slučaju kolizije robota s objektima iz okoline, uređaj za čišćenje sapnice, rezanje žice i nanošenje sredstva protiv naljepljivanja kapljica te elektrolučni senzor AX-AR.



Slika 32. Almega OTC AX V6

U sustav je integrirana i funkcija Synchromotion koja objedinjuje složeno gibanje robota i pozicionera i osigurava konstantnu brzinu zavarivanja i nagib pištolja pri zavarivanju složenih oblika i proizvoda. U sustavu su dva izvora struje za zavarivanje i to za MIG/MAG DP400 i TIG DP300 DC/AC pri čemu je izmjena pištolja i načina zavarivanja automatska. Oba izvora su vodom hlađene inverterske jedinice s mogućnošću impulsnog zavarivanja. To konkretno znači da se na jednom proizvodu mogu izmjenjivati TIG i MIG/MAG, ovisno o tehnološko – ekonomskim zahtjevima. Karakteristike izvora struje za MAG zavarivanje OTC Daihen DP 400 prikazane su u tablici 6.

Tablica 6. Karakteristike izvora struje OTC Daihen DP 400

Izvor struje OTC Daihen DP 400		
Priključeni napon, V / Hz		400 / 50
Područje struje zavarivanja, A		30 – 400
Područje napona zavarivanja, V		15,5 – 34
Intermitencija	100 %	283
	50 %	400
Promjer žice za zavarivanje, mm		0,8 – 1,2
Masa, kg		46
Dimenzije (D x Š x V), mm		653 x 300 x 595



### 5.1.2. Oprema za D-Arc postupak zavarivanja

Glavni dio robotske stanice (slika 33) je robot OTC FD-V20S koji ima 7 rotacijskih stupnjeva slobode gibanja. Rotacija sedme osi omogućava izbjegavanje kolizije bez promjene pozicije i/ili nagiba alata. Konstantno zadržavanje optimalne pozicije i nagiba alata rezultira jednostavnijim programiranjem i poboljšanom kvalitetom zavara.




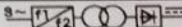

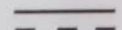


Slika 33. Robotska stanica za D-Arc postupak zavarivanja

Sustav uz robot čine dva izvora struje za zavarivanje koji maksimalno mogu isporučiti struju do 1000 A pri čemu je na glavni izvor struje spojeno modularno niskofrekventno upravljanje naponom kako bi se izračunala trenutna struja ovisno o odgovarajućem nagibu vanjske karakteristike. Izvori struje prikazani su na slici 34.



Slika 34. Izvori struje za D-Arc postupak zavarivanja

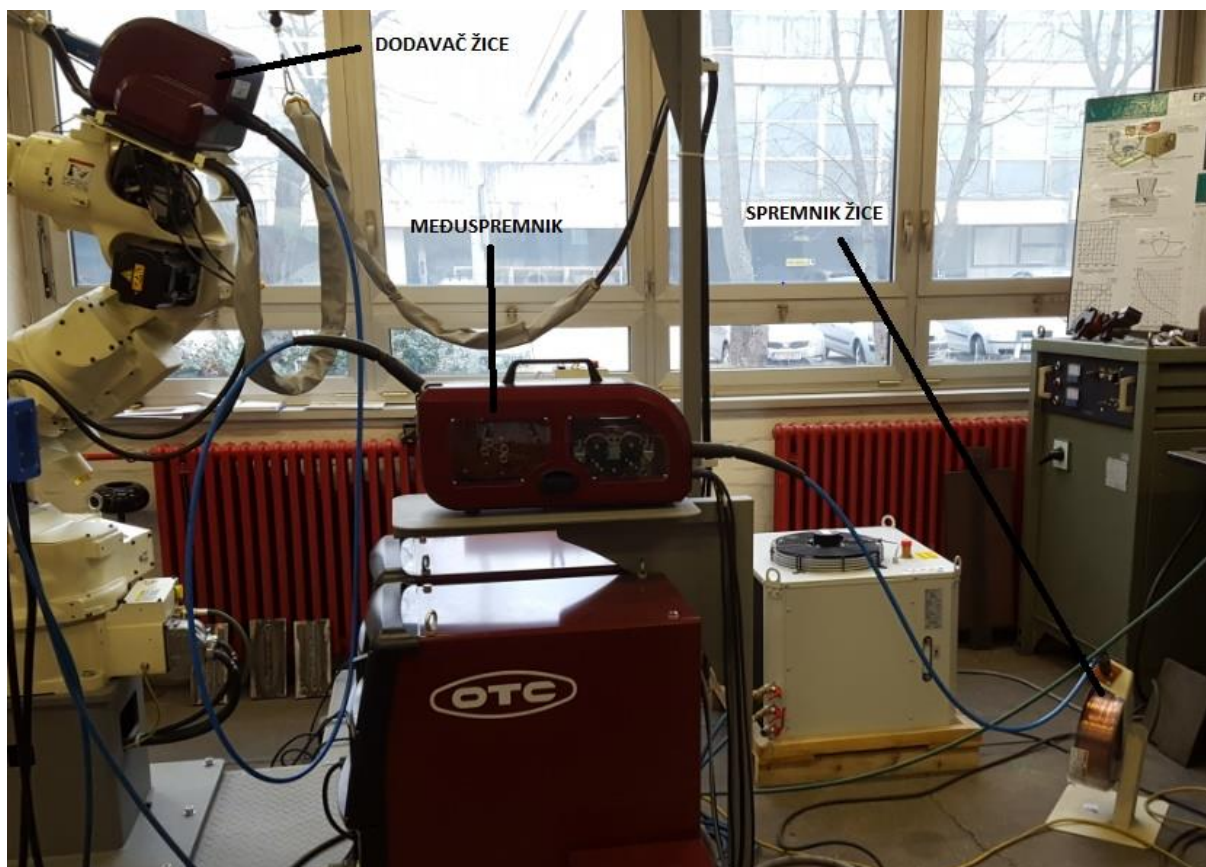
Slika 35 prikazuje karakteristike izvora struje WB – M500D korištenih kod D-Arc postupka zavarivanja.

		<b>DAIHEN Corporation</b>		
4-1, KOYOCHO-NISHI, HIGASHINADA-KU, KOBE, HYOGO, JAPAN				
DC WELDING POWER SOURCE		WB-M500D	Y4434YPZ123781001	DATE 2017
			IEC60974-1	
		30 A / 15.5 V - 360 A / 55.0 V		
	$U_0 = 113 \text{ V}$	X		100 %
		$I_2$		360 A
		$U_2$		55.0 V
	3~ 50/60 Hz	$U_1 = 400 \text{ V}$	$I_{1\max} = 34 \text{ A}$	$I_{1\text{eff}} = 34 \text{ A}$
IP23			Mass 81 kg	
MADE IN CHINA				A7903

Slika 35. Karakteristike izvora struje WB – M500D

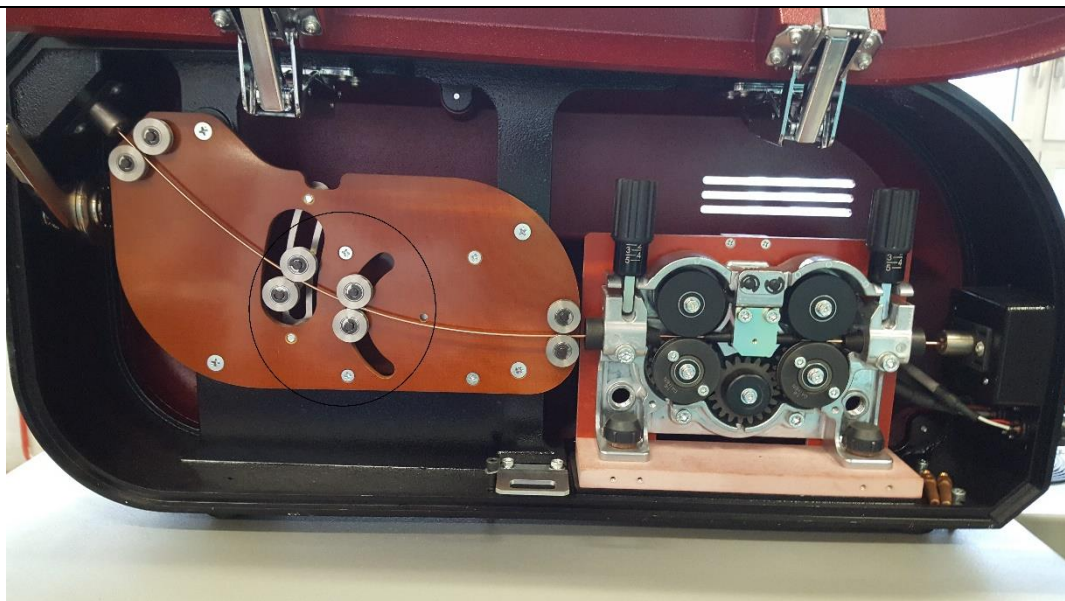


Sustav za dodavanje žice sastoji se od spremnika žice, dodavača i međuspremnika od kojih je svaki upravljan vlastitim servo upravljačem. Dodavač žice s maksimalnom brzinom dodavanja žice od 100 m/min smješten je na tijelu robota i spojen zajedno sa međuspremnikom žice. Sustav je prikazan na slici 36.



**Slika 36. Sustav za dodavanje žice**

Međuspremnik žice u sustav je postavljen zbog velike udaljenosti spremnika i dodavača žice. Na taj način postiže se lakša i preciznija kontrola brzine dodavanja žice. Na slici 37 prikazan je međuspremnik žice i u njemu sustav za zatezanje i otpuštanje žice (zaokruženo). Međuspremnik je kontroliran upravljačem koji registrira prebrzo ili presporo dodavanje žice u sustav. Ako je dodavanje žice prebrzo, kotačići se spuštaju i smanje napetost žice što automatski znači usporavanje. Ako je dodavanje presporo, kotačići se podižu i zatežu žicu te se tako brzina dodavanja povećava.



Slika 37. Meduspremnik žice

## 5.2. Osnovni materijal

Osnovni materijal koji se koristio u eksperimentu je čelik S355. Čelik S355 (EN 10025-2) spada u opće konstrukcijske čelike za široku upotrebu uz odličnu zavarljivost te se često koristi zbog boljih mehaničkih svojstava s obzirom na uobičajeno upotrebljavan čelik S235. Isporučuje se hladno valjan u pločama lima, profilima i cijevima u širokom spektru debljina, ovisno o eksploatacijskim svojstvima. Široko se upotrebljava u građevinskoj, proizvodnoj, brodograđevinskoj i *off-shore* industriji zbog niske cijene i široke dostupnosti [38].

Toplinska obrada u svrhu očvrnuća čelika S355 nije preporučljiva, ali je u ograničenim mogućnostima dozvoljena. U slučaju da se toplinska obrada provodi, faktori poput vršne temperature, brzine zagrijavanja i hlađenja te vremena držanja ovise o obliku, veličini i debljini profila. Generalne preporuke za toplinsku obradu normalizacije su zagrijavanje na temperaturu 20 – 50 °C iznad temperature  $A_{c3}$  (911 °C) te držanje 3 min / 1 mm debljine. Očekivano poboljšanje mehaničkih svojstava je povećanje udarnog rada loma i čvrstoće materijala uz eliminaciju segregacija u obliku dendritnih zrna unutar mikrostrukture [39].

Tablica 7 prikazuje kemijski sastav čelika S355, dok tablica 8 prikazuje njegova mehanička svojstva za nominalnu debljinu od 16 mm.

**Tablica 7. Kemijski sastav čelika S355 za nominalnu debljinu 16 mm [39]**

Čelik	C%	Mn%	P%	S%	Si%
S355	0,23	1,6	0,05	0,05	0,05

Tablica 8. Mehanička svojstva čelika S355 za nominalnu debljinu 16 mm [39]

Čelik	Granica razvlačenja, MPa	Vlačna čvrstoća, MPa
S355	355	630

### 5.3. Dodatni materijal i zaštitni plinovi

Kao dodatni materijal za zavarivanje uzorka 1 korištena je puna žica proizvođača Elektroda Zagreb d.d. trgovačkog imena EZ – SG 2 promjera 1,2 mm dok je za uzorak 2 korištena žica VAC 60, naziva G42 5M/C G3Si1 prema ISO 14341-A promjera 1,6 mm. Tablica 9 prikazuje kemijski sastav, a tablica 10 mehanička svojstva žice VAC 60. Na slici 38 prikazane su specifikacije žice EZ – SG2.

Slika 38. Specifikacije žice EZ – SG 2 [40]

**Tablica 9. Kemijski sastav žice VAC 60 [2]**

C	Si	Mn	P	S
0,08	0,90	1,50	< 0,025	< 0,025

**Tablica 10. Mehanička svojstva žice VAC 60 [2]**

Žica	Granica razvlačenja, MPa	Vlačna čvrstoća, MPa
VAC 60	> 420	500 - 640

U eksperimentu su korištena dva različita plina. Kod MAG zavarivanja korišten je plin Ferroline C18, a kod D-Arc zavarivanja tehnički ugljični dioksid. U tablici 11 prikazani su plinovi korišteni u eksperimentu te njihovi sastavi.

**Tablica 11. Volumni sastav zaštitnih plinova [41]**

Plin	Grupa po ISO 14175	Volumni sastav [%]		Postupak po HRN EN 14610	Primjena
		Ar	CO <sub>2</sub>		
Ferroline C18	M21	82	18	MAG M	Nelegirani i niskolegirani čelici
Tehnički ugljični dioksid	C1	-	100	MAG M	

#### 5.4. Priprema uzoraka

Priprema uzoraka sastoji se od sljedećih koraka:

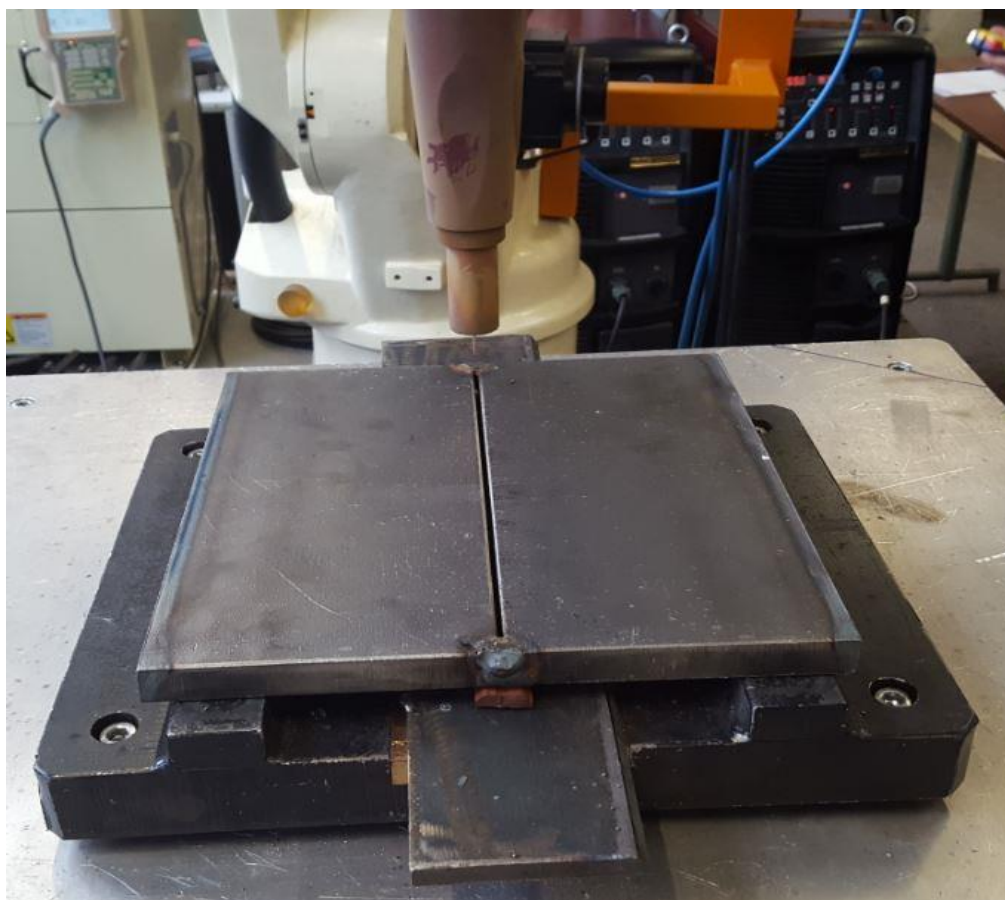
- rezanje plazmom
- brušenje
- pripajanje
- postavljanje keramičkih pločica
- stezanje na pozicioner robota (slike 39 i 40).

Kod MAG postupka zavarivanja uzorak je potrebno stegnuti na pozicioner robota zbog velikih deformacija koje se javljaju uslijed zavarivanja većeg broja prolaza, što kod D-Arc postupka nije slučaj. Slike 41 i 42 prikazuju crteže pripreme spojeva i redoslijeda prolaza za zavarivanje.

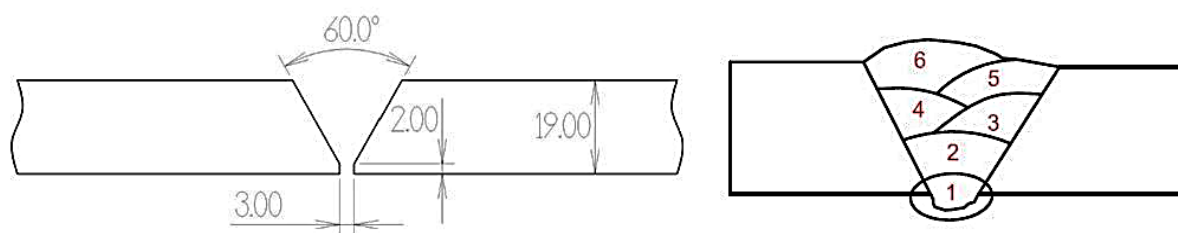




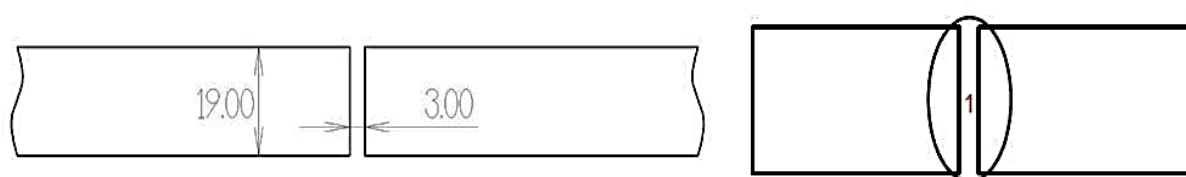
**Slika 39. Pozicioniranje uzorka za MAG postupak zavarivanja**



**Slika 40. Pozicioniranje uzorka za D-Arc postupak zavarivanja**



**Slika 41. Priprema spoja i redoslijed prolaza za MAG postupak zavarivanja**



**Slika 42. Priprema spoja i redoslijed prolaza za D-Arc postupak zavarivanja**

## 5.5. Zavarivanje uzoraka

Uzorak 1 zavarjen je konvencionalnim MAG postupkom zavarivanja u šest prolaza, dok je uzorak 2 zavarjen D-Arc postupkom zavarivanja u samo jednom prolazu. Cilj eksperimenta je usporedba ovih postupaka zavarivanja te konačni izbor optimalnog postupka sa stajališta cijene, utrošenog vremena i materijala te kvalitete konačnog proizvoda (deformacije, mikrostruktura, makrostruktura i mehanička svojstva).

### 5.5.1. MAG postupak zavarivanja

Uzorak 1 zavarjen je u šest prolaza. Nakon svakog prolaza metalnom četkom očišćen je gornji dio zavara te je izmjerena međuprolazna temperatura infracrvenim termometrom Fluke 568 IR Thermometer. Međuprolazna temperatura za svaki prolaz bila je ispod 150 °C, a slobodni kraj žice 15 mm. Ostali parametri prikazani su u tablici 12.

Unos topline računa se prema izrazu:

$$Q = k \times \frac{U \times I}{v_z} \times \frac{60}{1000}, \text{ kJ/cm} \quad (1)$$

Gdje je:

$Q$  – unos topline u zavar, kJ/cm

$k$  – stupanj iskorištenja postupka zavarivanja (kod MAG postupka iznosi 0,8)

$U$  – napon zavarivanja, V

$I$  – jakost struje zavarivanja, A

$v_z$  – brzina zavarivanja, cm/min

**Tablica 12. Parametri zavarivanja MAG postupkom**

Prolaz	Jakost struje, A	Napon, V	Brzina, cm/min	Unesena toplina, kJ/cm
1.	214	22	30	7,53
2.	305	32,5	30	15,86
3.	337	32,1	30	17,31
4.	337	32	30	17,31
5.	360	32,2	30	18,55
6.	333	33,3	30	17,74

Nakon prvog prolaza vidljivo je da je unos topline bio premali i da je rastaljena premala količina materijala (slika 43). Stoga je za sljedeći prolaz unesena toplina gotovo dvostruko veća. Već nakon 2 prolaza vidljive su velike deformacije materijala. Slika 44 prikazuje uzorak 1 nakon završnog prolaza gdje su deformacije još više izražene te je vidljivo preveliko nadvišenje zavara uzrokovano prevelikim unosom topline.





**Slika 43. Korijski prolaz**



**Slika 44. Deformacija nakon završnog prolaza**



### 5.5.2. D-Arc postupak zavarivanja

Uzorak 2 zavaren je u jednom prolazu uz slobodni kraj žice 15 mm. Ostali parametri prikazani su u tablici 13.

**Tablica 13. Parametri zavarivanja D-Arc postupkom**

Prolaz	Jakost struje, A	Napon, V	Brzina, cm/min	Unesena toplina, kJ/cm
1.	550	41,5	30	36,52

Iz tablice je vidljivo kako je unesena toplina otprilike dvostruko veća od one u MAG postupku zavarivanja što je uzrokovalo značajno rasprskavanje tijekom zavarivanja prikazano na slikama 45 i 46. Nadalje, slika 47 prikazuje jasno vidljive prekide u korijenu zvara svakih 50 mm uzrokovane otjecanjem taline ispred električnog luka. Ako je količina taline prevelika, onaj dio koji je najudaljeniji od luka ohladi se na keramici prije nego luk stigne do tog dijela.



**Slika 45. Rasprskavanje tijekom D-Arc postupka zavarivanja**



**Slika 46. Metalne kapljice uzrokovane rasprskavanjem tijekom zavarivanja**



**Slika 47. Diskontinuitet korijena zavora**

Međutim, na slici 48 jasno je vidljivo kako je deformacija uzorka nakon D-Arc postupka zavarivanja zanemariva u odnosu na onu nakon MAG-a.



**Slika 48. Deformacije nakon D-Arc postupka zavarivanja**

## **5.6. Provedena ispitivanja**

Kako bi se napravila usporedba s obzirom na isplativost i kvalitetu uzoraka zavarenih MAG i D-Arc postupcima zavarivanja, provedena su sljedeća ispitivanja:

- radiografsko ispitivanje
- analiza makrostrukture i mikrostrukture
- mjerenje tvrdoće po Vickersu (HV10).

### **5.6.1. Radiografsko ispitivanje**

Radiografsko ispitivanje provedeno je kako bi se detektirale geometrijske nepravilnosti (poroznosti, pore, uključci, pukotine) u metalu zavora. Radiografsko snimanje izvedeno je izvorima zračenja (RTG izotopi) na slikovne ploče s kojih se skeniranjem slika prebacuje na računalo u obliku digitalnog zapisa kojeg je moguće analizirati pomoću raznih računalnih alata.

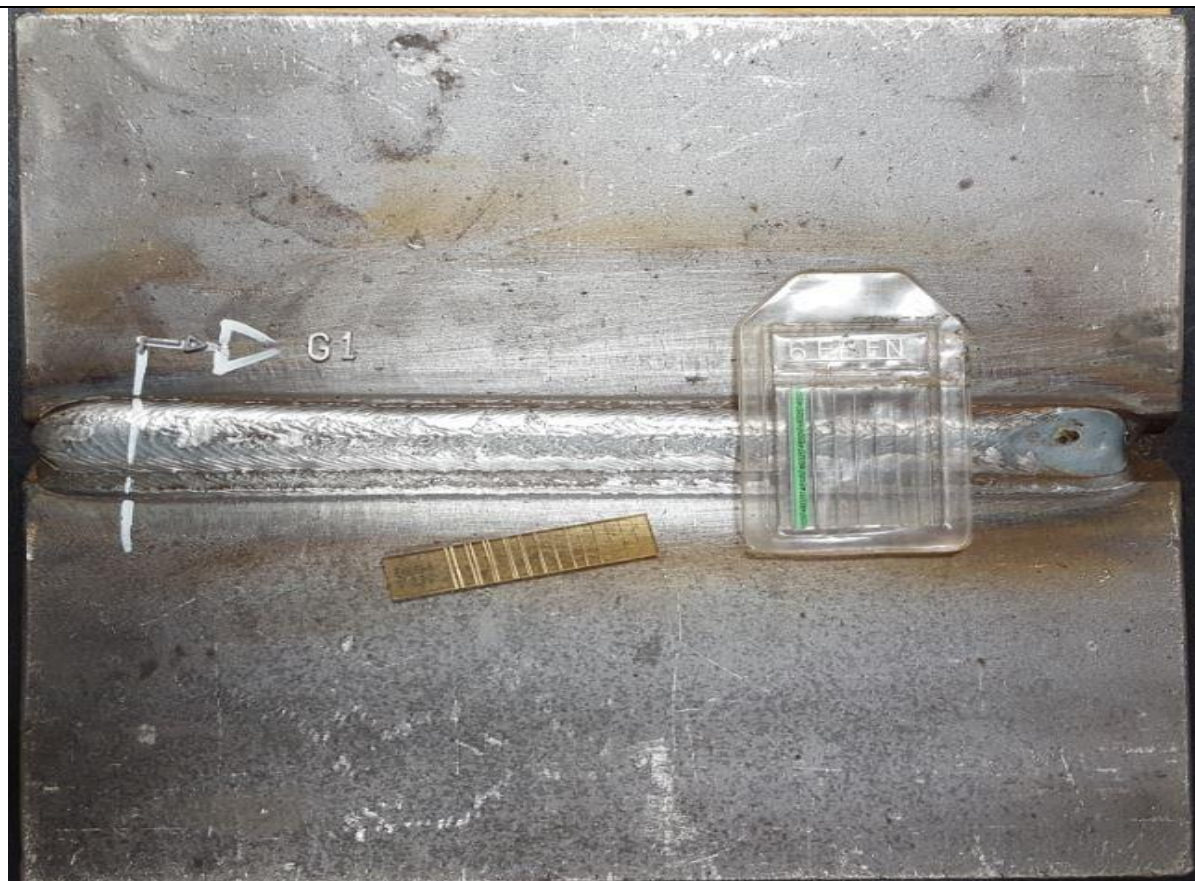
Slika 49 prikazuje uzorak 1 prije radiografskog snimanja. Na slici se vide i žični indikatori kvalitete slike. Napravljeni su tako da se između folija od plastične mase nalazi pravilno

raspoređenih sedam kalibriranih žica različitih dimenzija od materijala koji približno odgovara materijalu koji se prozračuje. Indikatori služe za određivanje kvalitete radiograma. Tablicom 14 prikazani su podaci o opremi zajedno s parametrima snimanja i skeniranja.

**Tablica 14. Podaci o opremi te parametri skeniranja i snimanja**

Podaci o rendgenu, skeneru i slikovnoj ploči	
Rendgen	BALTEAU 300D
Skener	VMI 5100
Slikovna ploča	Kodak industrex flex HR
Parametri skeniranja	
Napon lasera	15 V
Napon fotomultiplikatora	5,25 V
Rezolucija skeniranja	50 $\mu\text{m}$
Parametri snimanja	
Napon	225 kV
Struja	4 mA
Vrijeme ekspozicije	3 min 15 sec
Film – fokus udaljenost	700 mm



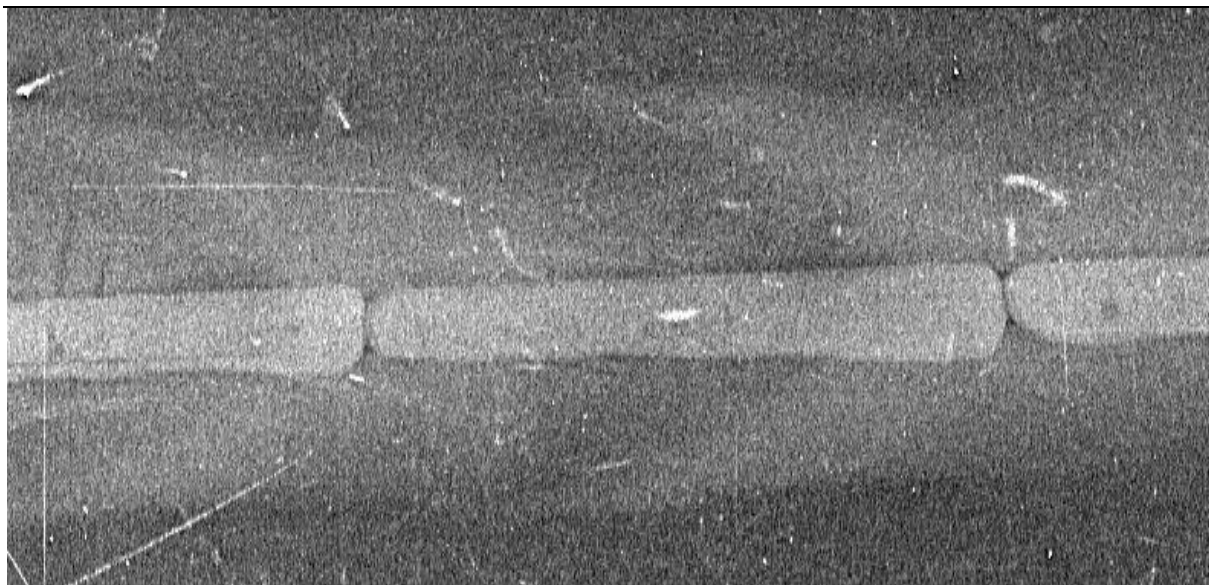


**Slika 49. Uzorak 1 prije radiografskog ispitivanja**

Na slikama 50 i 51 prikazani su radiogrami uzorka 1 (MAG) i uzorka 2 (D-Arc).



**Slika 50. Radiogram uzorka 1**



**Slika 51. Radiogram uzorka 2**

Na radiogramu uzorka 1 vidljiva je poneka pora nastala uslijed brzog skrućivanja taline uzrokovane velikom površinom uzorka (brzo odvođenje topline) te uključak troske nastao zbog nedovoljnog čišćenja između prolaza. Na radiogramu uzorka 2 vidljivo je mnogo više grešaka kao što su prekidi u korijenu zavora, pore kružnog oblika i pore u obliku takozvane *riblje kosti* te uključci. Na oba radiograma vidljive su bijele točkice koje predstavljaju rasprskavanje tijekom zavarivanja.

### **5.7. Analiza makrostrukture i mikrostrukture**

Analiza makrostrukture i mikrostrukture provedena je na trima makroizbruscima od kojih je jedan izrezan iz uzorka 1 (MAG), a dva iz uzorka 2 (D-Arc). Iz uzorka 2 izrezana su dva makroizbruska zbog vidljivih prekida u korijenu zavora. Tako je jedan izrezan na mjestu provarenog korijena (makroizbrusak 2) dok je drugi izrezan na mjestu prekida (makroizbrusak 3). U tablici 15 prikazano je daljnje označavanje makroizbrusaka.

**Tablica 15. Označavanje makroizbrusaka**

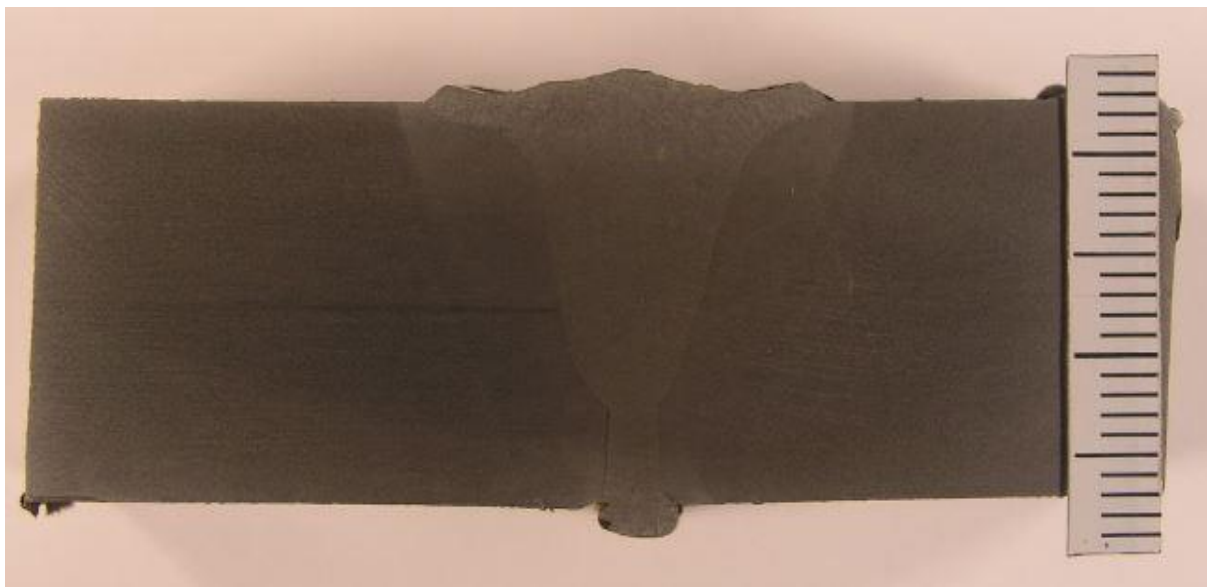
Oznaka	Postupak	Pozicija
Makroizbrusak 1	MAG	Sredina uzorka
Makroizbrusak 2	D-Arc	Korijen
Makroizbrusak 3		Prekid korijena



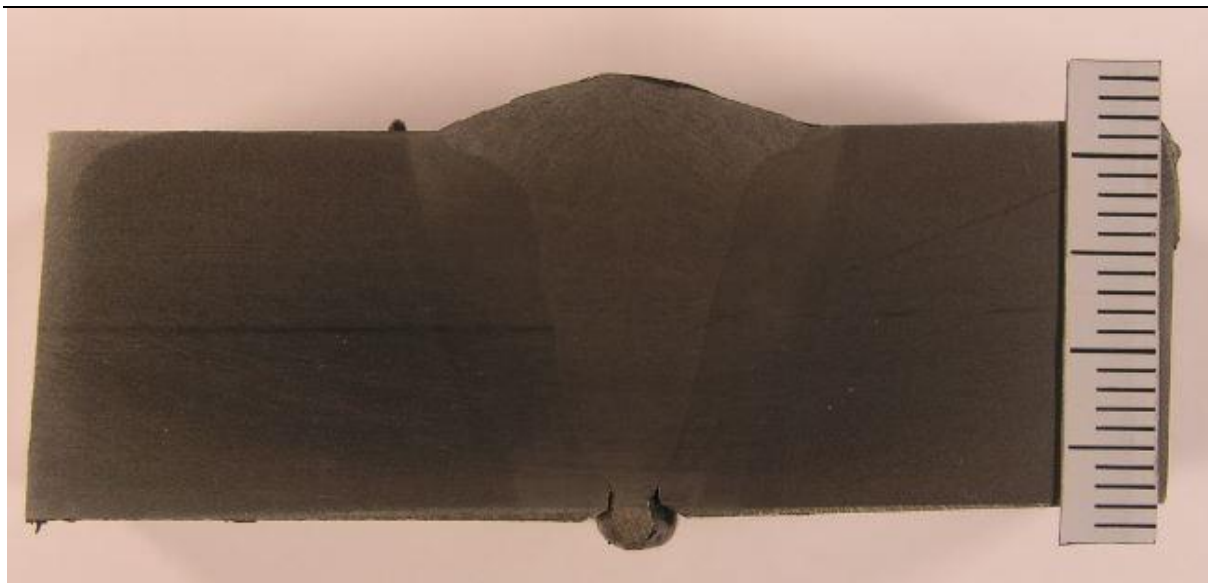
Pogledom makrostrukture na uzorku 1 vidljivo je veliko nadvišenje lica zavara zbog prevelikog unosa topline u završnom prolazu te su vidljive značajne deformacije uzorka 1 uzrokovane velikim brojem prolaza u odnosu na uzorak 2 kod kojeg su praktički zanemarive. Također, vidljivo je i kako je kod uzorka 1 površina zavara znatno veća dok je kod uzorka 2 veća zona utjecaja topline izazvana velikim unosom topline u samo jednom prolazu. Slike 52 – 54 prikazuju makroizbruske uzoraka.



**Slika 52. Makroizbrusak 1**



**Slika 53. Makroizbrusak 2**



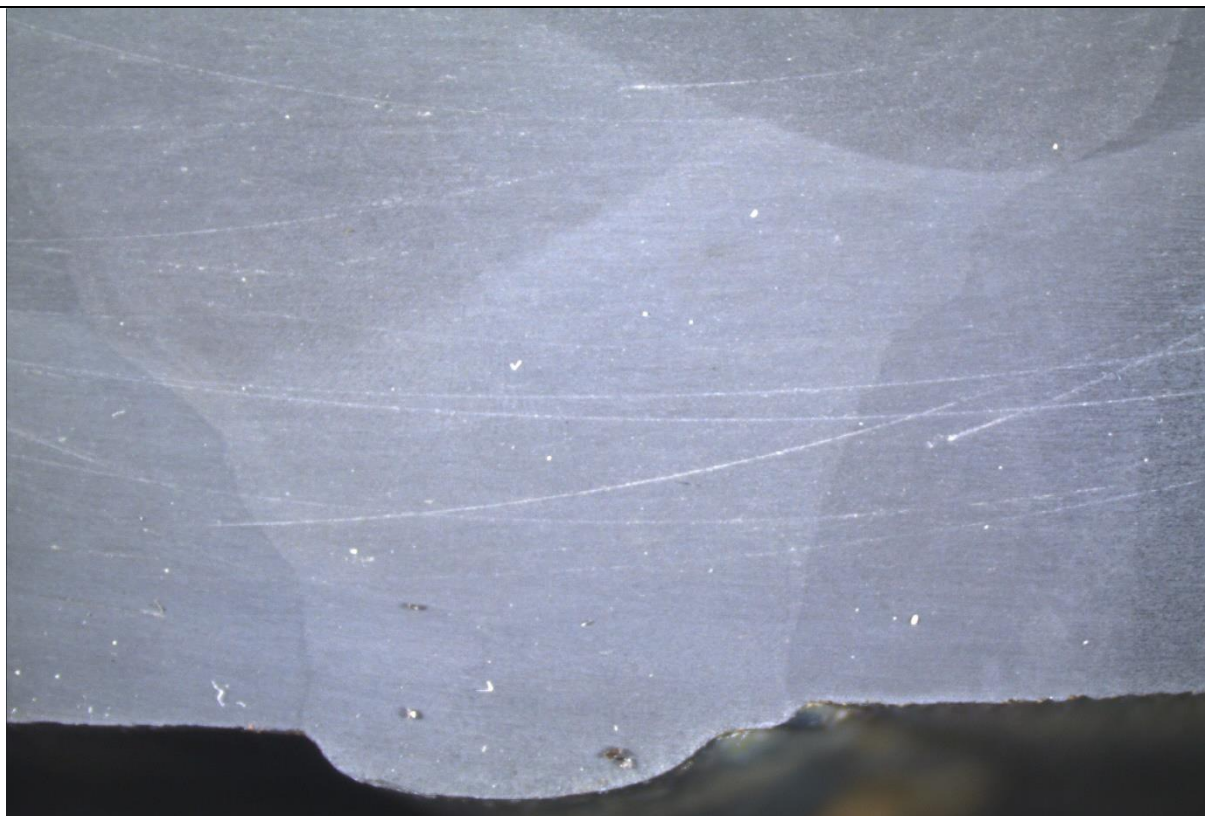
**Slika 54. Makroizbrusak 3**

Na makroizbruscima 2 i 3 uz razliku u provaru korijena vidljiva je i razlika u nadvišenju lica zavara što ukazuje na nestabilnost procesa zavarivanja. Također, unatoč provarenom korijenu, s lijeve strane materijala zavara vidljivo je naljepljivanje nastalo uslijed nalijeganja taline na hladnu neprotaljenu površinu osnovnog materijala. Na takvim mjestima izostaje čvrsta strukturna veza u zavarenom spoju.

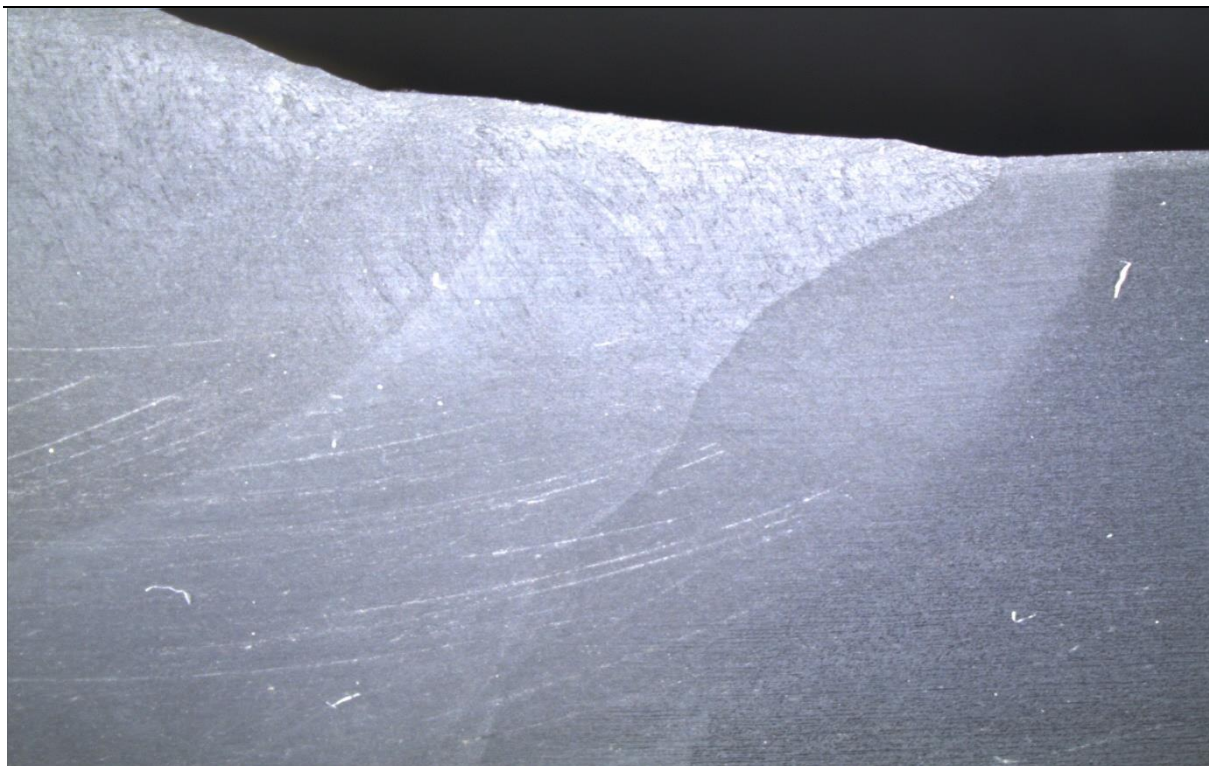
Što se tiče mikrostrukture, pogledom pod mikroskopom kod oba uzorka vidljiva je razlika u veličini zrna lica zavara te sredine i korijena zavara. Dok je u licu zavara prisutna grubozrnata struktura zbog sporijeg hlađenja, u korijenu i sredini zavara prisutno je sitnije zrno (normalizacija).

Kod uzorka 2 (D-Arc) vidljiv je smjer skrućivanja taline od bočnih zidova prema sredini u smjeru lica zavara za što je zaslužan rotirajući luk ispod površine taline. Da je skrućivanje taline krenulo paralelno od bočnih zidova prema sredini bez izlaza prema licu zavara, najvjerojatnije bi došlo do pojave toplih pukotina u sredini zbog gubitka sposobnosti metala zavara da izdrži naprezanja nastala skupljanjem u posljednjoj fazi skrućivanja kod visokih temperatura. Slike 55 – 60 prikazuju pogled makroizbrusaka pod mikroskopom. Za detaljniju analizu mikrostrukture potrebna su veća povećanja.

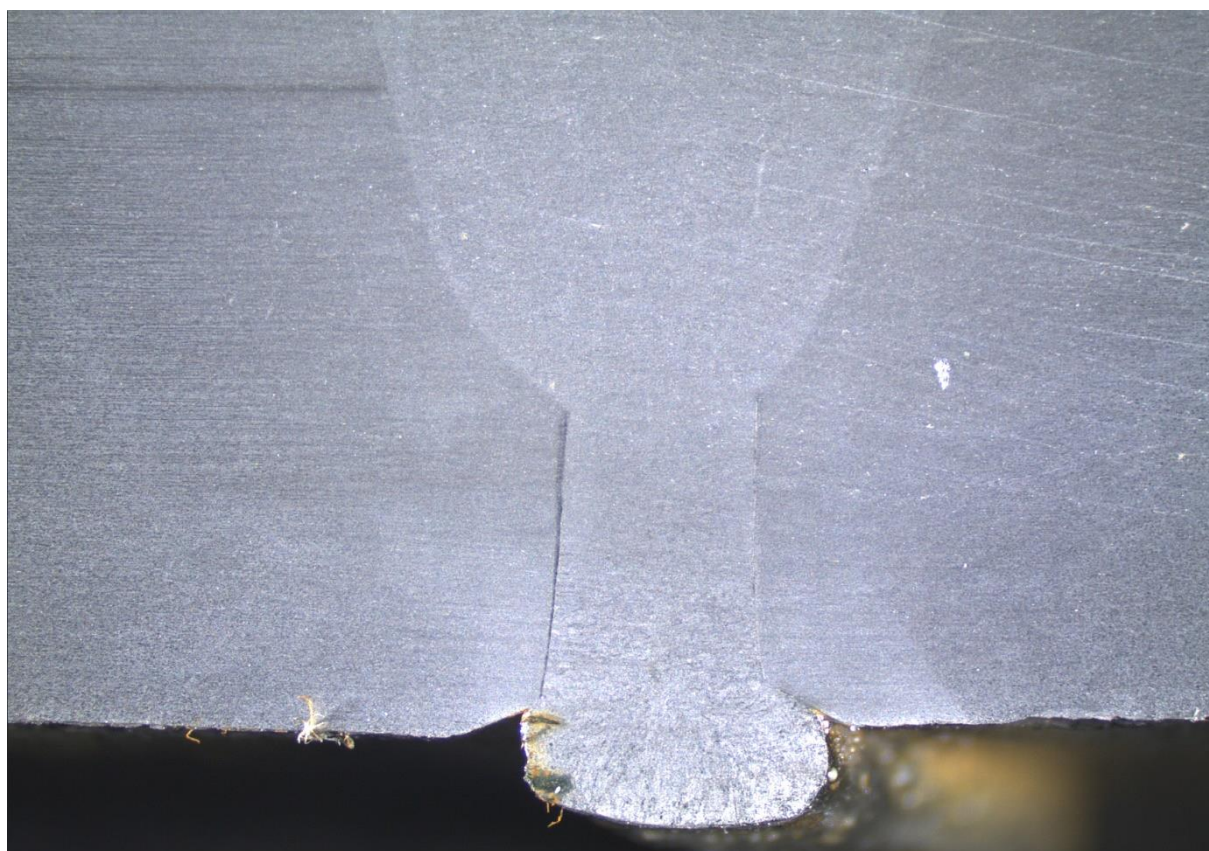




**Slika 55. Makroizbrusak 1 – korijen zavara**

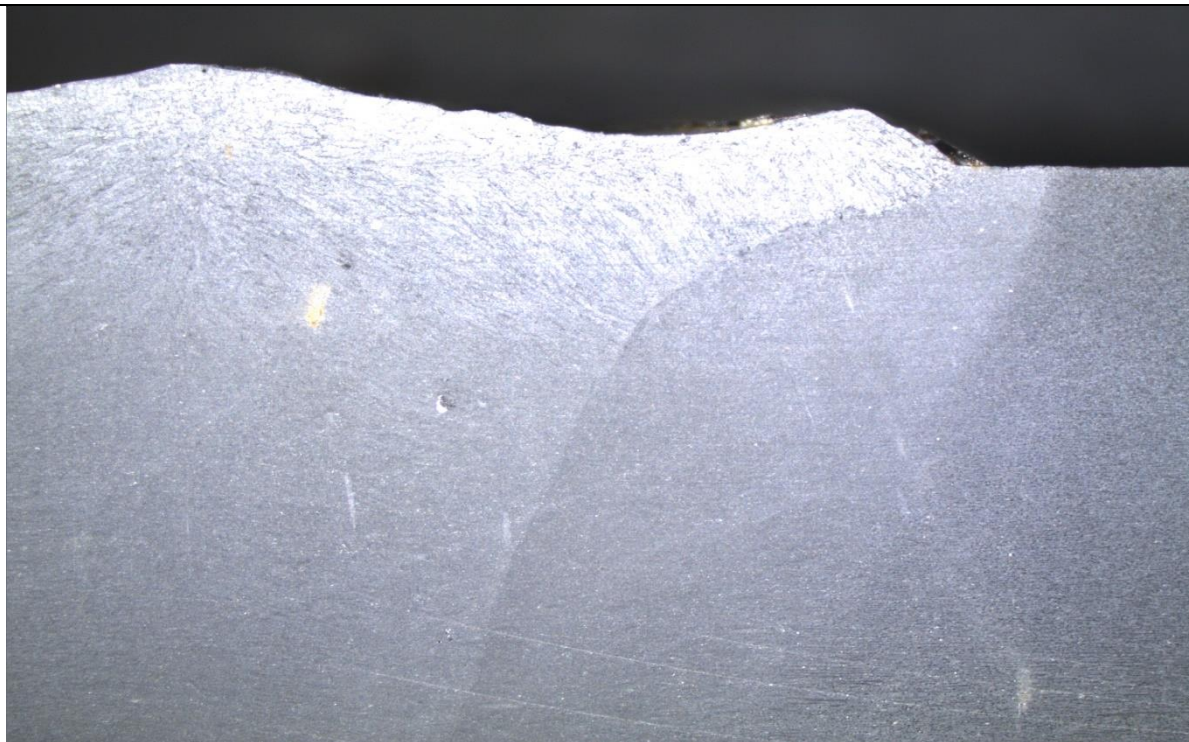


**Slika 56. Makroizbrusak 1 – lice zavara**



**Slika 57. Makroizbrusak 2 – korijen zavara**

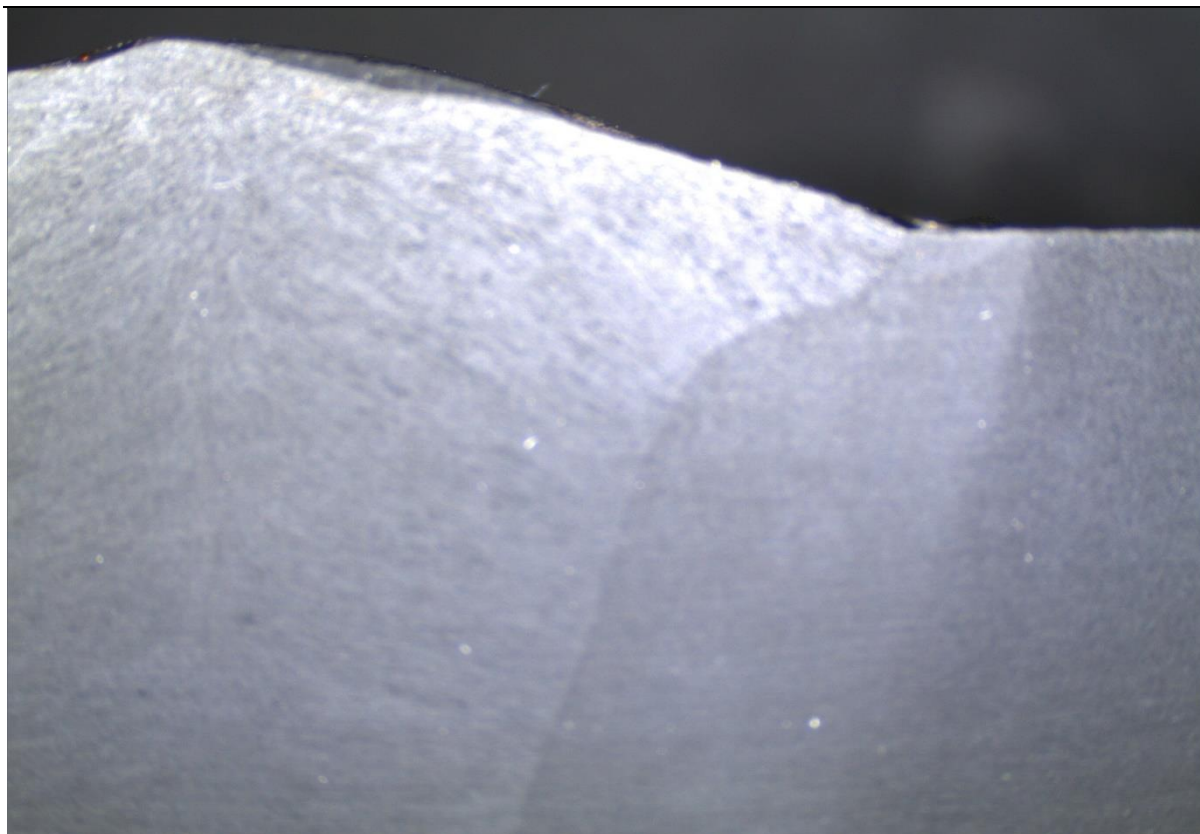




**Slika 58. Makroizbrusak 2 – lice zavora**



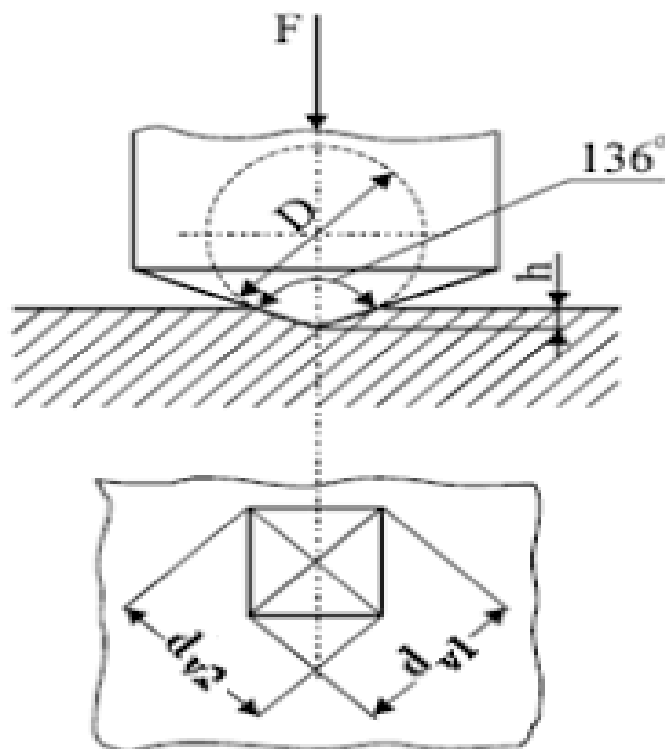
**Slika 59. Makroizbrusak 3 – korijen zavora**



**Slika 60. Makroizbrusak 3 – lice zavara**

### **5.8. Mjerenje tvrdoće**

Mjerenje tvrdoće izvršeno je Vickersovom metodom (HV10). Vickersova metoda ispitivanja tvrdoće (slika 61) univerzalna je metoda te su uklonjeni glavni nedostaci koji se javljaju kod Brinellove metode kao što su ograničeno područje mjerenja tvrdoća i ovisnost tvrdoće o sili utiskivanja. Ova metoda koristi se za meke i tvrde materijale, a kao penetrator koristi četverostranu istostraničnu dijamantnu piramidu s vršnim kutom od  $136^\circ$ . Ispitni uzorci na kojima se ispituje tvrdoća moraju imati glatku ravnu površinu bez oksida, stranih tijela i maziva osim u slučaju kada je to drugačije propisano standardima proizvoda koji se ispituju. Za očitavanje rezultata koristi se mjerni mikroskop kojim se očitavaju duljine dijagonala prema čemu se tvrdoća po Vickersu očitava iz tablice. Trajanje opterećenja iznosi 10 sekundi [42].



Slika 61. Vickersova metoda ispitivanja tvrdoće [43]

Prednosti [42]:

- nakon mjerenja ostaje malen otisak pa se površina jako ne oštećuje
- mogućnost mjerenja vrlo tankih uzoraka
- metoda je neovisna o mjernoj sili.

Nedostaci [42]:

- potreba za fino obrađenom površinom
- potreban je mjerni mikroskop za mjerenje dijagonale otiska.

Za potrebe ovog rada, mjerenje tvrdoće HV10 provedeno je u Laboratoriju za zavarivanje, na uređaju Reichert. Postupak mjerenja tvrdoće započinje stezanjem uzorka u škripac na uređaju. Zatim je potrebno podesiti odgovarajuću visinu uzorka, tj. koristeći grubi i fini fokus uzorak se pozicionira po vertikalnoj osi na potrebnu visinu na kojoj se jasno vidi mikrostruktura uzorka. Nakon fokusiranja, pomoću 2 mikrometra uzorak se pozicionira u horizontalnoj ravnini u željenu točku mjerenja. Pri odabranoj točki mjerenja, gornji dio uređaja zakrene se za  $90^\circ$  te se tako prebaci iz položaja sustava za mjerenje u položaj mehanizma za opterećivanje dijamantne četverostrane piramide.

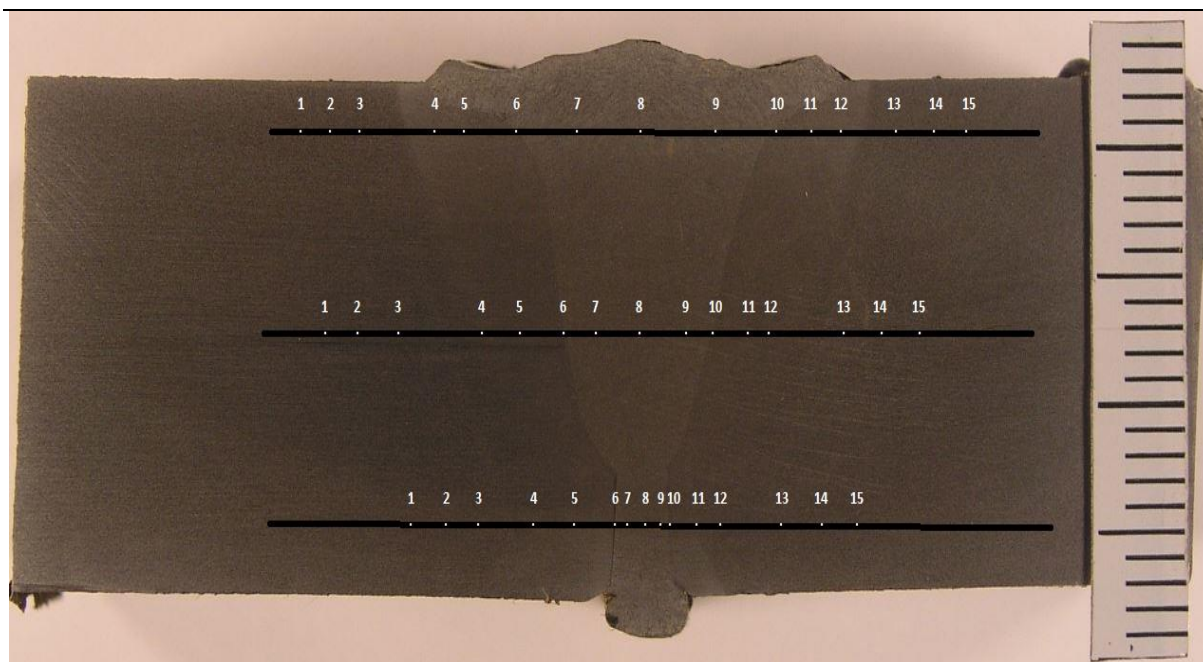


Okretanjem ručke, obavlja se se penetracija indentora u uzorak koja traje 10-ak sekundi. Po završetku penetracije, ručka se vraća u prvobitni položaj, kao i gornji dio uređaja. Pomoću mikroskopa očitaju se vrijednosti dijagonala u vertikalnom i horizontalnom smjeru te se prema tim vrijednostima izračuna srednja vrijednost dijagonala koja služi za izračunavanje vrijednosti tvrdoće po Vickersu.

Mjerenje tvrdoće (slika 62) provedeno je na makroizbruscima 1 (MAG) i 2 (D-Arc) u 45 različitih točaka na svakom uzorku, po 15 točaka na zacrtanim horizontalnim linijama od kojih se prva nalazi na udaljenosti 3 mm od lica zavora, druga u sredini makroizbruska i treća 3 mm od korijena zavora. Mjerenja po linijama izvršena su s tri točke u osnovnom materijalu te ZUT-u lijevo i desno od zavora i tri točke u samom zavaru. Slika 63 prikazuje točke mjerenja tvrdoće makroizbruska 2. Na istim mjestima mjerena je tvrdoća i na makroizbrusku 1. Tablice 16 i 17 prikazuju vrijednosti izmjerenih tvrdoća na istaknutim mjestima.



**Slika 62. Mjerenje tvrdoće**



Slika 63. Točke mjerenja tvrdoće na makroizbrusku 2

Tablica 16. Vrijednosti tvrdoće makroizbruska 1 (MAG)

Pozicija	Točke	Lice	Sredina	Korijen
Osnovni materijal - lijevo	1	160	163	161
	2	169	172	165
	3	176	170	171
ZUT - lijevo	4	188	181	170
	5	207	186	180
	6	205	207	171
Zavar	7	203	199	190
	8	206	198	199
	9	192	191	198
ZUT – desno	10	198	193	198
	11	207	186	189
	12	191	178	178
Osnovni materijal - desno	13	177	172	173
	14	177	165	176
	15	169	168	176

**Tablica 17. Vrijednosti tvrdoće makroizbruska 2 (D-Arc)**

Pozicija	Točke	Lice	Sredina	Korijen
Osnovni materijal - lijevo	1	167	170	167
	2	170	175	168
	3	172	176	170
ZUT - lijevo	4	193	185	172
	5	203	192	170
	6	212	221	173
Zavar	7	202	203	201
	8	206	202	196
	9	207	205	197
ZUT – desno	10	206	201	187
	11	203	194	181
	12	193	180	175
Osnovni materijal - desno	13	176	168	167
	14	173	170	171
	15	170	175	170

## 5.9. Analiza rezultata

Nakon zavarivanja oba uzorka te prije provedbe nerazornih i razornih ispitivanja, vidljive su mnoge prednosti D-Arc postupka zavarivanja u odnosu na MAG postupak kao što su jednostavnija priprema spoja i pozicioniranje uzorka, manja potrošnja dodatnog materijala i zaštitnog plina te zanemarive deformacije zavarenog uzorka. Sve to postignuto je upravo zbog mogućnosti zavarivanja uzorka u samo jednom prolazu. Tablice 18 i 19 prikazuju ukupno trajanje oba postupka.

**Tablica 18. Ukupno trajanje MAG postupka zavarivanja**

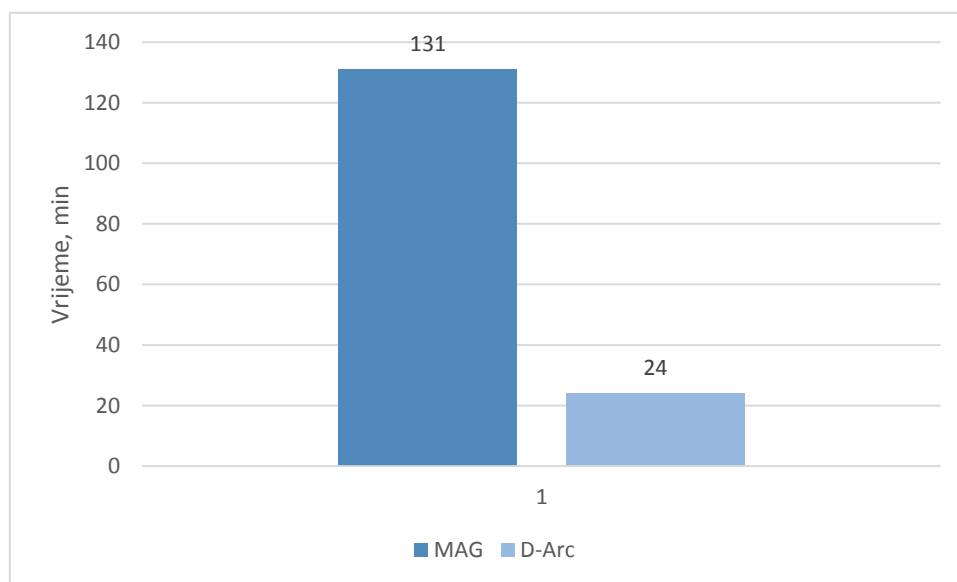
MAG postupak zavarivanja	Vrijeme, min
Priprema i pozicioniranje uzorka	40
Izrada programa (6 prolaza)	45
Zavarivanje (6 prolaza)	6
Ukupno vrijeme čekanja između prolaza	40
Ukupno vrijeme procesa	131



**Tablica 19. Ukupno trajanje D-Arc postupka zavarivanja**

D-Arc postupak zavarivanja	Vrijeme, min
<b>Priprema i pozicioniranje uzorka</b>	15
<b>Izrada programa (1 prolaz)</b>	8
<b>Zavarivanje (1 prolaz)</b>	1
<b>Ukupno vrijeme procesa</b>	24

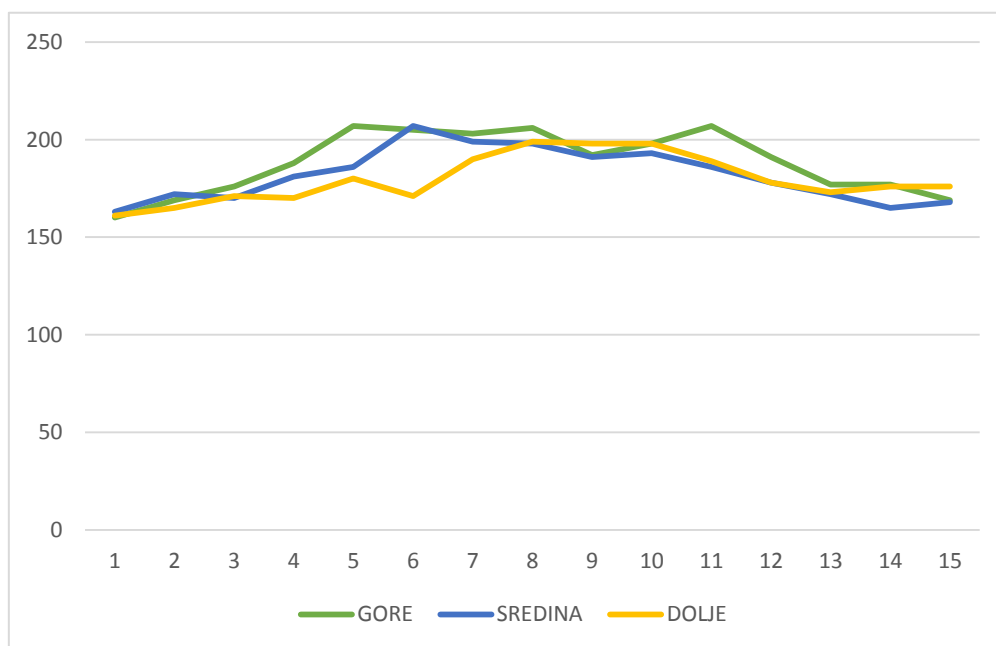
Iz tablica je vidljivo kako je sa stajališta produktivnosti D-Arc postupak mnogo učinkovitiji (gotovo šest puta) od MAG postupka zavarivanja i to najviše zbog velike razlike u broju potrebnih prolaza. Slika 64 prikazuje usporedbu trajanja MAG i D-Arc postupaka zavarivanja.

**Slika 64. Usporedba trajanja MAG i D-Arc postupaka zavarivanja**

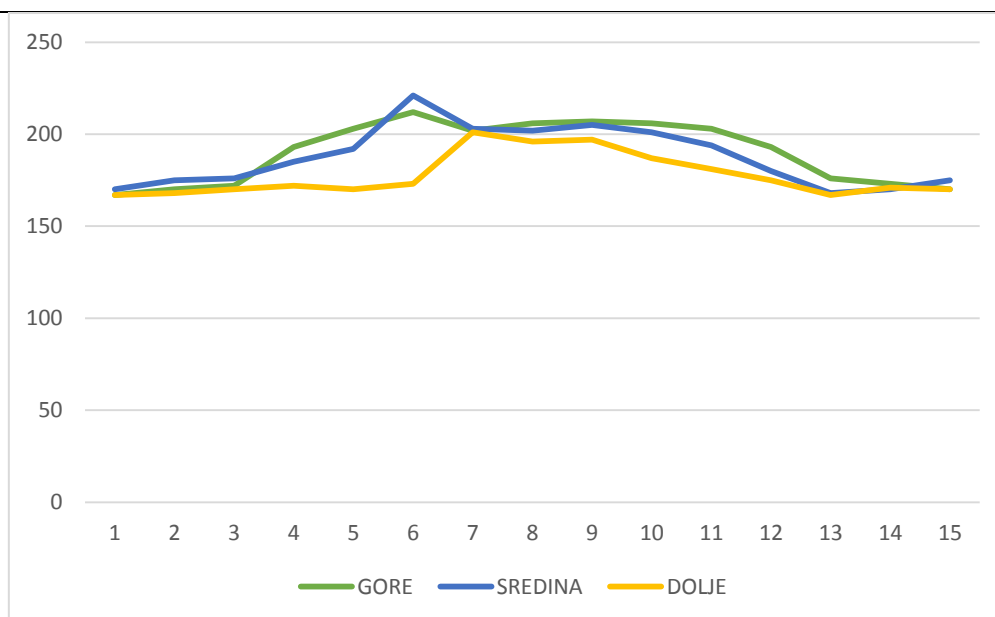
Međutim, nakon provedenog radiografskog ispitivanja te pogledom na makroizbruske uzoraka jasno je vidljivo mnogo više grešaka kod D-Arc postupka kao što su pore, uključci, naljepljivanje te neprovareni korijen. Sve to upućuje na veću kvalitetu spoja zavarenog MAG postupkom zavarivanja.

Na slikama 65 i 66 dan je grafički prikaz izmjerenih tvrdoća uzoraka po linijama prikazanima na slici 63. Na grafovima je vidljivo kako nema razlike u tvrdoći osnovnog materijala što odgovara korištenju jednakog materijala za oba uzorka. Vidljiv je i porast tvrdoće u ZUT-u i zavaru u odnosu na osnovni materijal što je također očekivano. Što se tiče razlika u tvrdoći

svakog uzorka po zacrtanim linijama (gore, sredina, dolje), vidljivo je kako značajnih razlika nema, uz iznimku zone utjecaja topline u kojoj je tvrdoća veća na liniji uz lice zavora i na sredini uzorka u odnosu na korijen zavora. Uzrok tome je znatno veća količina rastaljenog metala u tim područjima što ujedno znači i veću zonu utjecaja topline. Zaključno, kao rezultat ovog ispitivanja vidljivo je kako nema značajne razlike u tvrdoći te sukladno tome ni čvrstoći uzorka zavorenog MAG postupkom u odnosu na uzorak zavoren D-Arc postupkom zavarivanja.



**Slika 65. Grafički prikaz tvrdoće uzorka 1 (MAG)**



Slika 66. Grafički prikaz tvrdoće uzorka 2 (D-Arc)

Na kraju analize, u tablici 20 prikazana je usporedba prednosti i nedostataka provedenih postupaka.

Tablica 20. Prednosti i nedostaci provedenih postupaka

Kriterij	MAG	D-Arc
<b>Oprema</b>	Jednostavnija	Složenija
<b>Priprema uzoraka</b>	Složenija	Jednostavnija
<b>Potrošnja dodatnog materijala i plina</b>	Veća	Manja
<b>Ukupno trajanje procesa</b>	Dugotrajan proces	Kratkotrajan proces
<b>Deformacije uzoraka</b>	Velike	Zanemarive
<b>Izgled zavarar</b>	Bolji	Lošiji
<b>Nepravilnosti u zavarenome spoju</b>	Vrlo malo	Mnogo



## 6. ZAKLJUČAK

Primjena zakopanog luka pri MAG zavarivanju u zaštiti 100 % CO<sub>2</sub> uz primjenu pune žice moguća je uz korištenje novorazvijenog valnog oblika struje za stabilizaciju procesa. Novi sustav za visokoučinkovito zavarivanje D-Arc karakterizira:

- novorazvijena niskofrekventno modulirana kontrola napona postiže stabilan zakopani luk s dubokom penetracijom
- visokoučinkoviti sustav D-Arc omogućuje zavarivanje nelegiranih čelika debljine 19 mm u jednom prolazu
- razvijen je visokoučinkoviti robotizirani sustav za zavarivanje kako bi se omogućila primjena zakopanog luka pri jakim strujama.

Na temelju provedenog eksperimenta na prvi pogled možemo zaključiti kako je D-Arc mnogo ekonomičniji i produktivniji u odnosu na konvencionalni MAG postupak zavarivanja. Razlog tome je vrlo kratko ukupno trajanje procesa (gotovo 6 puta kraće u odnosu na MAG) što je omogućeno zavarivanjem uzorka u samo jednom prolazu dok je MAG postupak zavarivanja proveden u šest prolaza s hlađenjem uzorka ispod međuprolazne temperature. To je također izazvalo gotovo zanemarive deformacije te mnogo manju potrošnju dodatnog materijala i zaštitnog plina u odnosu na MAG postupak. Međutim, nakon provedenih ispitivanja vidljivo je kako ta početna brzina i jednostavnost postupka za sobom nosi mnogo grešaka. Već na prvi pogled, golim okom vidljiva je nestabilnost procesa na licu i u korijenu zavora. Radiografskim ispitivanjem uočene su mnoge nepravilnosti poput većih i manjih pora, uključaka, naljepljivanja te neprovarenog korijena. Pogledom makroizbrusaka pod mikroskopom vidljiva je grubozrnata struktura koja se prostire od sredine prema licu zavora za što je očekivano da će negativno utjecati na mehanička svojstva materijala. Sve te negativnosti uzrokovane bilo nepravilnim izborom parametara, bilo nepravilnom pripremom uzoraka ukazuju na nedostatak provedenih istraživanja D-Arc sustava na različitim materijalima u različitim uvjetima.

Iako je D-Arc sustav još u procesu istraživanja i unaprijeđivanja, jasno je da će primjena ovog sustava sa svim njegovim prednostima u budućnosti rezultirati brzim i ekonomičnim rješenjima problema u području zavarivanja.



## LITERATURA

- [1] Hayato, B., Tetsuo, E., Tomoyuki, U., Manabu, T.: Development of High Efficiency Welding for Thick Plate Steel Using Stabilized High Current Burried Arc, Zbornik radova zavarivačke tehnologije, Japan, 2017.
- [2] Vuherer, T., Garašić, I., Kastelic, P.: Properties of Butt-weld joint welded by new D-arc process, Doc.XII-2373-18 /212-1537-18 /IV-1374-18, FSB Zagreb, Slovenija, 2018.
- [3] Milotić, M.: Priručnik za zavarivače 2. Dopunjeno izdanje, BCD Elektro d.o.o Doboj, Saobraćajni fakultet Doboj, Doboj, 2008.
- [4] Kralj, S., Andrić, Š.: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Sveučilište u Zagrebu, FSB, Zagreb, 1992.
- [5] Horvat, M., Kondić, V. : The examples of modified procedures of MIG/MAG welding, Technical journal 6, 2(2012), 137 – 140
- [6] Brezetić, J.: Tehnologija II - Zavarivanje, Veleučilište u Karlovcu, Podloge za učenje
- [7] Brumec, G.: Zavarivanje cjevovoda MAG postupcima, Završni rad, FSB, 2010.
- [8] Samardžić, I.: Zavarivanje i zavarivanju srodne tehnike, Sveučilište u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu
- [9] Herak, I.: Primjena i specifičnosti MAG - STT postupka zavarivanja, Završni rad, FSB, Zagreb, 2008.
- [10] <http://www.dtzi.hr/upload/pdf/2.%20SEMINAR/Brosura%20seminar%202.pdf>, dostupno 18.5.2018.
- [11] Miller, Guidelines For Gas Metal Arc Welding (GMAW), USA, 04.2012.
- [12] Garašić, I., Kožuh, Z.: Priručnik iz kolegija Strojevi i oprema za zavarivanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [13] [http://www.electro-cal.com/pdf/MIG\\_Welding.pdf](http://www.electro-cal.com/pdf/MIG_Welding.pdf), dostupno 18.5.2018.
- [14] <http://www.cesva.cz/TransSteel-2200c-MP-Set-EF-d272.htm>, dostupno 18.5.2018.
- [15] <http://www.lincolnelectric.com/en-us/support/process-and-theory/Pages/inverter-based-power-detail.aspx>, dostupno 18.5.2018.
- [16] <http://www.lincolnelectric.com/en-us/support/process-and-theory/Pages/inverter-power-detail.aspx>, dostupno 18.5.2018.
- [17] Jeffus, L.: Welding Principles and Applications, 7th Edition, Cengage Learning, USA, 2012.

- 
- [18] <https://www.manualslib.com/manual/915264/Kemppi-Kempact.html>, dostupno 18.5.2018.
- [19] [http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable MIGGMAWwires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf](http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWwires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf), dostupno 18.5.2018.
- [20] <http://pdf.directindustry.com/pdf/esab/pulsed-mig-welding/18224-84894.html>, dostupno 18.5.2018.
- [21] Garašić, I., Kožuh, Z., Kralj, S., Tomić, T., Glogović, Z., Primjena izmjenične struje kod MAG navarivanja legure Inconel 625, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [22] Norrish, J.: Advanced welding processes, Cambridge 1997.
- [23] Grist, J.: Solidstate controls – what solid-state controls can do for welding, Weld Des Fabric, August, 1977
- [24] [https://www.google.hr/search?biw=1517&bih=707&tbm=isch&sa=1&ei=51gOW\\_HOL\\_KGC6QTb1quoCA&q=dodava%C4%8D+%C5%BEice+mag&oq=dodava%C4%8D+%C5%BEice+mag&gs\\_l=img.3...5512.6610.0.7023.4.4.0.0.0.152.485.0j4.4.0....0...1c.1.64.img..0.0.0....0.GQlQwUXG8W8#imgsrc=1WCV16Q9FPbxfM](https://www.google.hr/search?biw=1517&bih=707&tbm=isch&sa=1&ei=51gOW_HOL_KGC6QTb1quoCA&q=dodava%C4%8D+%C5%BEice+mag&oq=dodava%C4%8D+%C5%BEice+mag&gs_l=img.3...5512.6610.0.7023.4.4.0.0.0.152.485.0j4.4.0....0...1c.1.64.img..0.0.0....0.GQlQwUXG8W8#imgsrc=1WCV16Q9FPbxfM)., dostupno 30.5.2018.
- [25] Rudan, M.: Zavarivanje u zaštiti plina taljivom elektrodom (MIG/MAG), Postupci zavarivanja i njihov utjecaj na kvalitetu i troškove u proizvodnji (jednodnevni seminar), Pula, 08. 12. 2005.
- [26] [http://www.electro-cal.com/pdf/MIG\\_Welding.pdf](http://www.electro-cal.com/pdf/MIG_Welding.pdf), dostupno 30.5.2018.
- [27] Lincoln Electric Company: Gas Metal Arc Welding Guidelines, Cleveland, Ohio, 2006.
- [28] [http://www.svarbazar.cz/phprs/storage/lincoln\\_mig\\_welding\\_guide.pdf](http://www.svarbazar.cz/phprs/storage/lincoln_mig_welding_guide.pdf), dostupno 30.5.2018.
- [29] Petrović, V.: Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2010.
- [30] ASM handbook vol 6, „Welding brazing and soldering“, ASM international, 1993.
- [31] Juraga, I., Ljubić, K., Živičić, M.: Pogreške u zavarenim spojevima, Zagreb 2007.
- [32] Norma EN ISO 6520-1 „Classification of geometric imperfections in metallic materials“ 2007.
- [33] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/defects-solidification-cracking-044/>, dostupno 15.6.2018.
- [34] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-hot-cracking-solidification-cracking/>, dostupno 15.6.2018.



- 
- [35] <https://www.wilhelmsen.com/globalassets/marine-products/welding/documents/wilhelmsen-ships-service---unitor-welding-handbook.pdf>, dostupno 15.6.2018.
- [36] <https://www.weldpedia.com/2014/08/10-causes-of-weld-porosity-and-their-practicable-preventions.html>, dostupno 15.6.2018.
- [37] <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/manufacturing-of-welded-joints-with-realistic-defects/>, dostupno 15.6.2018.
- [38] E. Zagreb, Katalog dodatnog materijala, 2015.
- [39] <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6022>, dostupno 19.6.2018.
- [40] <http://www.ezg.hr/proizvodi/wire/EZSG2.html>, dostupno 19.6.2018.
- [41] <http://www.messer.hr/products/castolin/tabzavrez.pdf>, dostupno 19.6.2018.
- [42] Ivan, V.: Ispitivanje mehaničkih svojstava metalnih materijala, Slavonski Brod; Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 2006.
- [43] [https://www.google.hr/search?q=vickers+metoda+mjerenja+tvrdo%C4%87e&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiq-9WzpOfbAhUB2SwKHTErBhwQ\\_AUICigB&biw=1517&bih=705#imgsrc=L6xKCCkHQ0UO5M](https://www.google.hr/search?q=vickers+metoda+mjerenja+tvrdo%C4%87e&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiq-9WzpOfbAhUB2SwKHTErBhwQ_AUICigB&biw=1517&bih=705#imgsrc=L6xKCCkHQ0UO5M)., dostupno 22.6.2018.

## **PRILOZI**

### **I. CD-R disc**